



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

EFFECTO SOBRE LA RESISTENCIA MECANICA Y LAS
DISCONTINUIDADES EN LA SOLDADURA A TOPE POR
DESTELLO (FBW) DURANTE LA FABRICACION DE AROS
PARA RUEDAS DE ACERO

MIGUEL ARTURO ACOSTA ECHEVERRIA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
UNIDAD DE MATERIALES Y PROCESOS DE MANUFACTURA
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA
2015

EFFECTO SOBRE LA RESISTENCIA MECANICA Y LAS
DISCONTINUIDADES EN LA SOLDADURA A TOPE POR DESTELLO
(FBW) DURANTE LA FABRICACION DE AROS PARA RUEDAS DE
ACERO

MIGUEL ARTURO ACOSTA ECHEVERRIA
02300729

Tesis presentada como requisito parcial para optar el título de:
MAESTRO EN INGENIERIA DE MATERIALES Y PROCESOS

Director: Ing. PhD Rodolfo Rodríguez
Co-Director: Ing. PhD Juan Hernando Reyes

Línea de investigación:
Materiales y Procesos de Manufactura

Grupo de Investigación:
Innovación en Procesos de Manufactura e Ingeniería de Materiales -
IPMIM

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica
Unidad de materiales y procesos de manufactura
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA
2015

Miguel Acosta / FBW / V

*Este trabajo de grado lo dedico a
Dios por sostenerme en los
momentos difíciles, a mis
padres por su ejemplo de
compromiso y dedicación, a
mi esposa por su apoyo
incondicional, a mis hijos
por su compañía. Y a toda
mi familia por su ayuda.*

AGRADECIMIENTOS

El Autor expresa su agradecimiento,

Por su apoyo a mi director de tesis Ing. Rodolfo Rodríguez Baracaldo.

Por la colaboración en la elaboración de las probetas y su apoyo técnico y económico a Colombiana de Frenos S.A.

Por su apoyo en la realización de los ensayos al equipo técnico de Colombiana de Frenos S.A.

RESUMEN

En este estudio, se aplicó el proceso de soldadura a tope por destello (FBW) a algunas láminas de acero HSLA microaleado de la especificación SPFH 590 con un espesor de 2,3 mm; se realizaron varias probetas cambiando algunos parámetros del proceso de soldadura con el fin de investigar los efectos de estos cambios. Las partes soldadas y las zonas afectadas por el calor (HAZ) fueron revisadas por medio de inspección visual por un operario de soldadura entrenado, también se realizaron pruebas de resistencia a la tracción de las juntas, microdureza Knoop al material base y la zona afectada por el calor, análisis macrográficos y fractográficos. Los resultados obtenidos para las pruebas de tracción, muestran que la zona afectada por el calor en algunos casos presenta una resistencia mecánica menor que la del material base. La microdureza Knoop muestra valores altos hacia el centro de la zona afectada por el calor y valores bajos hacia los extremos de la misma zona. La macrografía permitió observar la línea central descarburada, situación típica de este proceso de soldadura. La fractografía muestra un comportamiento frágil en las juntas soldadas que sufrieron rotura por el cordón mientras que las juntas que sufrieron rotura fuera de la zona afectada por el calor, presentaron un comportamiento dúctil. La inspección visual realizada presenta una apariencia de la soldadura conforme con lo establecido en los estándares, lo que se traduce en la ausencia de discontinuidades como poros, grietas o contaminaciones detectables con este método de inspección.

Palabras Clave: Soldadura FBW, Acero HSLA, ZAC, Microdureza Knoop, Resistencia a la Tracción, Fractografía, Fractura frágil, Fractura dúctil

ABSTRACT

In this study, microalloyed HSLA SPFH 590 steel specimens of 2.3 mm in thickness were joined by flash butt welding process and the effects of varying some parameters of process were investigated. The welded parts and heat affected zones (HAZ) were checked by visual inspection by a trained operator welding, testing tensile strength of the joints, Knoop microhardness, analysis and fractographic and macrographic also were performed. The results obtained for the tensile tests show that the heat affected zone in some cases has a lower mechanical strength than the base material. The Knoop microhardness shows high values towards the center of the heat affected zone and values go down towards the ends of the same area. Macrography allowed to observe typical decarburized centerline of the welding process. The fractogram shows a brittle behavior in welded joints which suffered rupture cord while breaking the seals suffered outside the heat affected zone showed a ductile behavior. The visual inspection presents a weld appearance consistent with the provisions of the standards, resulting in the absence of discontinuities such as pores, cracks or detectable contamination in this inspection method.

Keywords: Flash butt welding, HSLA steel, HAZ, Knoop microhardness, Tensile strength, Fractography, Brittle Fracture, Ductile Fracture

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	7
1. Marco teórico.....	10
1.1. Ruedas de acero para automóviles	10
1.1.1. Materiales usados para la fabricación de ruedas	10
1.1.2. Aceros usados para la fabricación de ruedas de automóvil	12
1.2. Proceso de fabricación de aros para ruedas de acero.....	16
1.2.1. Proceso de fabricación del aro.....	18
1.3. Soldadura a tope por destello – Flash Butt Welding (FBW)	19
1.3.1. Definición y descripción general.....	19
1.3.2. Principios de operación de un soldador a tope por destello	20
1.4. Ensayos de caracterización de uniones soldadas por resistencia	23
1.4.1. Inspección y pruebas.....	24
1.4.2. Ensayos de caracterización.....	25
2. Metodología	28
2.1. Equipos	28
2.1.1. Equipo de soldadura.....	28
2.1.2. Microscopía.....	31
2.1.2.1. Microscopía óptica.....	32
2.1.2.2. Microscopía electrónica de barrido	33
2.1.3. Microdurómetro.....	34
2.2. Materiales.....	35
2.2.1. SPFH 590	35
2.3. Desarrollo experimental.....	36
2.3.1. Diseño de experimentos.....	36
2.3.2. Preparación de muestras.....	37
2.3.2.1. Fabricación de las uniones soldadas	37
2.3.2.2. Pulido y brillado	38
2.3.2.3. Macroataque	38
2.3.3. Técnicas de caracterización.....	39
2.3.3.1. Ensayos destructivos.....	39
2.3.3.1.1. Pruebas de resistencia a la tracción.....	39
2.3.3.1.2. Prueba de doblez	42
2.3.3.1.3. Dureza superficial – Microdureza Knoop	43
2.3.4. Ensayos no destructivos.....	44
3. Resultados experimentales y Discusión.....	46
3.1. Apariencia soldadura	46
3.1.1. Altura de recalado	47

3.1.2. Tiempo de destello	47
3.2. Microestructura	48
3.2.1. Microestructura del material base.....	48
3.2.2. Microestructura de la junta soldada.....	51
3.2.3. Análisis fractográfico.....	54
3.3. Pruebas mecánicas.....	57
3.3.1. Resistencia a la tracción.....	57
3.3.2. Microdureza.....	69
3.3.3. Pruebas de dobléz	80
4. Análisis de varianza (ANOVA)	84
4.1. Análisis de varianza del efecto de la combinación de parámetros definidos para el DOE	84
4.1.1. Elaboración de análisis de varianza ANOVA	84
4.1.2. Definición de los parámetros adecuados para proceso de soldadura.....	86
4.2. Definición del procedimiento para proceso de soldadura.....	87
5. Conclusiones y recomendaciones	89
5.1. Conclusiones	89
5.2. Recomendaciones	90
Bibliografía	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Olla Bronocice (Bronocice pot) correspondiente a los años 3500 a 3350 AC (Anthony, 2007)	11
Figura 2. . Rueda clásica de radios del segundo milenio AC (Zambil)	11
Figura 3. Vehículo antiguo con neumáticos. (Bolan, 2003).....	12
Figura 4. Rueda de acero estampada (Heck, 2004)	13
Figura 5. Rueda con radios de acero. (Heck, 2004).....	13
Figura 6. Grados de acero usados en fabricación de ruedas en el año 2002. (Gonzaga, 2011)....	15
Figura 7. Cubierta plástica usada en ruedas de acero de 5 brazos (five spoke wheels) (Gonzaga, 2011)	16
Figura 8. Disminución de peso y aumento de resistencia de los aceros usados en la fabricación de ruedas. (Gonzaga, 2011).....	16
Figura 9. Partes que conforman la rueda. Aro y disco.....	17
Figura 10. Proceso de fabricación de un aro de acero.....	18
Figura 11. Ajuste típico de la soldadura a tope por destello con una separación entre las caras de dos barras a soldar. (Latime & Matteson, 1993).....	20
Figura 12. Esquemático del proceso de soldadura a tope por destello. (Kim, So, & Kang, 2009).....	21
Figura 13. Sección transversal soldadura a tope por destello. (ASM, Flash Welding, 1993).....	22
Figura 14. Incremento de los puntos de contacto producidos por la entrada de calor durante la soldadura por destello. (ASM, Flash Welding, 1993).....	23
Figura 15. Soldador automático a tope por destello. Marca: Swift-Ohio. Modelo 91-AA.....	28
Figura 16. Soldador Swift-Ohio. Detalle de los pisadores y los electrodos.....	29
Figura 17. Soldador Swift-Ohio. Esquema leva-seguidor para movimiento de carro movable. (Swift, 1990)	29
Figura 18. A la izquierda, selector de posición (tap selector) soldador Swift-Ohio 91AA del soldador usado en esta investigación, Fuente: Autor. Derecha, Principio eléctrico para un selector eléctrico tipo on-load tap changer, Fuente: http://onloadtapchangersforp	30
Figura 19. Sistema leva-seguidor soldador Swift-Ohio 91AA.....	31
Figura 20. a). Microscopio Electrónico de Barrido FEI Quantas 200, b). Microscopio LECO 100X a 800X – IA32.....	33
Figura 21. Microdurómetro LECO.	34
Figura 22. Realización de uniones soldadas. a) Junta lista para ser soldada, b) Ejecución de la operación de soldadura, c) Junta soldada	38
Figura 23. Probeta de soldadura. Base para extracción de material para análisis por microscopía. Detalle en amarillo muestra el lugar de extracción de las muestras para elaborar las probetas de análisis por microscopía; en rojo zona afectada por el calor y en verde material base.....	38
Figura 24. Muestras insertadas en bakelita.....	39
Figura 25. Probeta resistencia a la tensión. (JSA, 1998).....	40
Figura 26. Probeta resistencia a la tensión junta soldada. Figura A.12. (AWS, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, 2010).....	41
Figura 27. Probetas para pruebas de resistencia a la tracción.	41

Figura 28. Esquema probeta prueba de doblez. Figura A.7. (AWS, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, 2010)	42
Figura 29. Plano dispositivo de prueba de doblez.	43
Figura 30. Dispositivo de ensayos de doblez.	44
Figura 31. Lupa 10x usada para la inspección visual.	45
Figura 32. A la izquierda, selector de posición (tap selector) soldador Swift-Ohio 91AA del soldador usado en esta investigación, Fuente: Autor. Derecha, Principio eléctrico para un selector eléctrico tipo on-load tap changer, Fuente: http://onloadtapchangersforp	46
Figura 33. Material base SPFH 590. En la columna de la derecha, se observa ferrita laminar del material base (color claro) obtenida por el proceso de laminado en caliente 400X y 800X. En la columna de la izquierda ferrita acicular desordenada (color claro) de la junta soldada 400X y 800X. GBF: Grain Boundary ferrite. SP: Side-plate ferrite P: Pearlite	49
Figura 34. Imagen obtenida por SEM del material base SPFH 590 a diferentes aumentos. Parte superior 1000X. Parte inferior 5000X.....	50
Figura 35. Material base estructura ferrítica S460MC. (Kerstens, 2009)	51
Figura 36. Imagen SEM (a) material base S460MC, los círculos indican bainita y (b) acercamiento a la bainita. (Kerstens, 2009).....	51
Figura 37. Probeta para análisis por microscopía óptica insertadas en bakelita. Corte transversal de la junta. Detalle en rojo zona afectada por el calor. El sentido de la laminación del material base SPFH 590 está en sentido horizontal. Imagen tomada a 10X.....	52
Figura 38. Macrosección de soldadura a tope por destello. Se observa línea blanca que indica zona descarburizada por el efecto de la soldadura. Igualmente encerrado en el círculo oscuro se observa una discontinuidad. (Kim, So, & Kang, 2009)	53
Figura 39. Micrografía SEM. a) Zona donde se realiza la unión, b) Material base.....	53
Figura 40. Imagen de microscopía óptica, microestructura acero ASTM A529. (Ziemian, Sharma, & Whaley, 2012)	54
Figura 41. Diferentes tipos de fractografías. (a) imagen acero para resortes con coalescencia de microgrietas cónicas (Fuente: ASM, 1987). (b) imagen desgarró laminar en acero de bajo carbono (Fuente: M. Möser, 2007). (c) imagen zona central junta probeta No. 4B fracturada con falla por microgrietas cónicas. (d) magnificación de lo visto en (c). (e) imagen zona central junta probeta No. 4B fracturada con falla desgarró laminar. (f) magnificación de lo visto en (e).....	55
Figura 42. Diferentes tipos de fractografías. (a) imagen acero de bajo carbono endurecido; separación fina. (Fuente: M. Möser, 2007). (b) imagen acero Cr-Ni dos fases con agrietamiento aislado de grano sencillo sin patrón de río (Fuente: M. Möser, 2007). (c) imagen zona central junta probeta No. 8B fracturada con falla por microgrietas cónicas. (d) magnificación de lo visto en (c). (e) imagen de oxidación interna: conchas límite de grano desprendidas (Fuente: M. Möser, 2007). (f) agrietamiento en relajación: límites de grano cubiertos con finos hoyuelos (Fuente: M. Möser, 2007). (g) imagen zona central junta probeta No. 8B fracturada con falla desgarró laminar. (h) magnificación de lo visto en (g). (i) imagen agrietamiento por hidrógeno en probeta No. 8B. (j) magnificación de lo visto en (i).	57
Figura 43. Curvas de resultado de prueba de resistencia a la tensión sobre probetas.....	65
Figura 44. Probetas pruebas tracción 1A, 1B, 7A y 7B, que presentaron rotura fuera de la junta de soldadura.	67

Figura 45. Probetas prueba tracción 2B, 3A, 8A y 8B, que presentaron rotura en la junta soldada. A la derecha se ve el detalle aumentado de la junta.....	68
Figura 46. Gráfico resumen de resultados de pruebas mecánicas.	69
Figura 47. Grafico microdureza Knoop para las réplicas “A” y “B” del estudio.	78
Figura 48. Gráfico promedio microdureza Knoop para las probetas A y B de cada uno de los tratamientos	79
Figura 49. Gráfico microdureza Knoop. Valores promedio del material base para cada uno de los tratamientos.	80
Figura 50. Prueba de doblez probeta con resultado conforme, probeta 1A.	81
Figura 51. Prueba de doblez con resultado no conforme, probeta 2A.	82
Figura 52. Probetas usadas en la prueba de doblez mostrando la ubicación de la fractura de las juntas soldadas con alta temperatura (H) y baja temperatura (L) de soldadura (Singh, Shahi, & Kaur, 2013).....	82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas del acero SPFH 590.....	35
Tabla 2. Composición química y propiedades mecánicas del acero SPFH 590 según norma JIS G 3134:2006 para lámina de 2.3 mm. (JSA, 1998)	35
Tabla 3. Niveles de los factores para el diseño de experimentos.	36
Tabla 4. Niveles de los factores para el diseño de experimentos	37
Tabla 5. Resultado de la evaluación visual de la superficie de la ZAC.	47
Tabla 6. Resultados pruebas de tracción.	66
Tabla 7. Resultados análisis microdureza Knoop.	70
Tabla 8. Microdureza Knoop material base.....	80
Tabla 9. Resultados prueba de dobléz.....	81
Tabla 10. Resultado análisis de varianza (ANOVA) para los resultados de resistencia a la tracción.	85
Tabla 11. Resultado análisis de varianza (ANOVA) para los resultados de % de elongación.	86
Tabla 12. Nivel del factor del tratamiento No. 4.	87
Tabla 13. Parámetros de soldadura para soldadura de resistencia por destello (FBW). (ISO, 2005)	88

INTRODUCCION

Las fábricas de autopartes incluidas las que diseñan y fabrican ruedas en chapa de acero se han visto en la necesidad de crear productos con aceros más livianos que a su vez cumplan con las características de durabilidad y desempeño que se requieren para las diferentes piezas. El uso de estos aceros más delgados y con propiedades mecánicas mejoradas respecto de los que usualmente son utilizados ha ocasionado que los procesos de manufactura se modifiquen con el fin de satisfacer los requerimientos dimensionales de los clientes.

En este momento se presentan dos necesidades que se deben satisfacer por medio del uso de estos materiales; la primera de ellas tiene que ver con la obligación que tienen las empresas fabricantes de ruedas de acero de mantenerse e incrementar su participación dentro del mercado de este tipo de partes debido en gran medida a que las ruedas de aluminio han tenido una gran acogida por parte de los fabricantes de vehículos por su atractiva apariencia y bajo peso lo que permite que el vehículo tenga un mejor desempeño en cuanto a consumo de combustible pero con un alto costo por pieza; la segunda necesidad consiste en trabajar en conjunto con los fabricantes de vehículos en la conservación del medio ambiente por medio del desarrollo de automóviles que tengan un buen desempeño en el consumo de combustible y que a su vez tengan un menor costo por medio del uso de ruedas de acero muy livianas y con apariencia más estilizada.

Por otro lado, este cambio de materiales pasando a los que presentan una alta resistencia y bajo espesor, también obliga a que los procesos de manufactura de las ruedas se modifiquen para poder procesarlas con los estándares de calidad que solicitan los clientes, esto puede ocasionar inconvenientes debido a que la maquinaria que se tiene en muchas de las plantas es de una tecnología que se encuentra en madurez en declive o es obsoleta y el cambio a una tecnología en estado del arte avanzado o madura es bastante difícil debido a que las condiciones del mercado no permiten la inversión de grandes sumas de dinero, por lo tanto se deben diseñar y realizar modificaciones a la maquinaria actual y diseñar y fabricar herramientas más robustas para que las plantas actuales puedan tener la capacidad de procesar estos nuevos materiales.

Los materiales que actualmente se usan en la fabricación de aros para ruedas de acero, corresponden a la generación de los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) o aceros microaleados HSLA con resistencia mecánica entre 500 MPa y 600 MPa dejando de lado los aceros de bajo carbono como son los aceros SAE 1012 o SAE 1015 que presentan resistencia mecánica alrededor de 340 MPa. Los espesores también han disminuido ostensiblemente, donde antes se usaban espesores de 2,8 mm o 2,5 mm, ahora se especifican espesores de 2,1 mm a 2,3 mm, lo que genera una reducción en el espesor de un 25% aproximadamente. Este cambio de aceros a unos más delgados y de mayor resistencia está asociado a la disminución del peso de las piezas que se presentó anteriormente.

El proceso de soldadura a tope por destello usado para la fabricación de aros para rines de acero es, dentro de los procesos de fabricación de los aros, el más sensible y complejo de manejar, esto debido a que las variables que se manejan en este proceso son muchas lo que lo hace tan susceptible a los cambios o variaciones del mismo, estas variables afectan directamente la calidad de la soldadura tanto en lo relacionado con la resistencia mecánica de las piezas soldadas como en los defectos de la misma

soldadura; dentro de estos parámetros encontramos los siguientes: voltaje, tiempo de destello, apertura inicial del carro, apertura final del carro, velocidad de avance del carro, alineación de la junta, estado del corte de la junta y distancia de recalcado (upset).

Por otro lado el tipo de material a soldar afecta como tal este proceso, ya que la composición química es un factor importante a considerar, por lo tanto al usar aceros microaleados HSLA, su composición dificulta la ejecución de la soldadura debido a la presencia de muchos elementos aleantes requeridos para alcanzar la resistencia mecánica. Debido a esto, la correcta definición de parámetros de soldadura, la ejecución correcta del proceso del mismo y el control durante la fabricación de las piezas se hacen necesarios con el fin de evitar la generación de defectos.

Se puede considerar como hipótesis para esta investigación que, *la combinación adecuada de parámetros de proceso de una máquina soldadora AC para el proceso de soldadura a tope por destello (FBW), permitirá soldar láminas de aceros HSLA Microaleado SPFH 590, con resultados de resistencia mecánica y discontinuidades de soldadura dentro de los requisitos mínimos aceptables para la fabricación de aros de rueda de acero.*

La motivación que se tiene para la realización de este trabajo de investigación, está comprendida en lo siguiente,

- La soldadura a tope por destello es el proceso más eficiente en cuanto a velocidad de producción y calidad de la soldadura aplicada tanto en resistencia mecánica como en las discontinuidades presentadas en la soldadura.
- El proceso de soldadura a tope por destello involucra variables tanto del mismo proceso (parámetros de la máquina) como del material a soldar, lo anterior hace necesario investigar el efecto de algunas de estas variables en la resistencia mecánica del material soldado y las discontinuidades de la soldadura cuando se utiliza una máquina soldadora AC y se procesa un acero HSLA microaleado.
- Conocer el comportamiento de las variables más importantes y su efecto sobre la resistencia mecánica de la junta soldada y las discontinuidades de la soldadura, permitirá definir la combinación más acertada de las mismas para la fabricación de aros de ruedas de acero.

Considerando la justificación académica e industrial de la investigación, se plantea como objetivo general de esta investigación lo siguiente:

- Estudiar el efecto que las variables de proceso: voltaje, altura de recalcado y tiempo de destello (flashing time), producen sobre la resistencia mecánica y las discontinuidades de la soldadura de un proceso de soldadura a tope por destello (Flash Butt Welding); ejecutado en una máquina soldadora AC para la fabricación de aros de rueda de acero para automóviles en acero HSLA Microaleado SPFH 590 de 2.3 mm.

Así mismo, los objetivos específicos que se pretende alcanzar con esta investigación son los siguientes:

- Definir parámetros de soldadura y realizar uniones soldadas con láminas de acero HSLA Microaleado SPFH590 de espesores de 2,3 mm por el proceso FBW.
- Evaluar y comparar el cambio en la estructura interna de la junta soldada del acero HSLA Microaleado SPFH590 de 2,3 mm con respecto a la estructura del material base.
- Estudiar la resistencia mecánica y las discontinuidades de la zona afectada por el calor (HAZ) de una junta soldada a tope por FBW de acero HSLA Microaleado SPFH590 de 2.3 mm.
- Establecer un procedimiento para el proceso de soldadura FBW de láminas de acero HSLA.

Los resultados y logros de cada uno de los objetivos planteados se plasman en los capítulos del presente documento. El capítulo uno presenta el marco teórico donde se expone de manera sencilla el proceso de fabricación de aros para rueda de automóvil usado en la empresa Colombiana de Frenos S.A., allí se hace énfasis en el proceso de soldadura a tope por destello (FBW), de igual forma se explica que ensayos de caracterización se usan comúnmente para evaluar la soldadura de este tipo.

El capítulo dos explica la metodología empleada para la realización de esta investigación, se hace énfasis en las máquinas usadas tanto para producir las juntas soldadas como en las que se usan para realizar los análisis de microscópicos y pruebas mecánicas, de igual forma se explican los materiales empleados para elaborar las juntas, finalmente se expone el diseño experimental empleado para realizar la combinación de las variables tomadas para llevar a cabo la investigación.

En el capítulo tres, se presentan los resultados tanto de análisis de microscopía como de ensayos mecánicos, se hace la discusión de los mismos haciendo énfasis en los parámetros que presentaron mejores resultados en cuanto a desempeño de la soldadura en estas pruebas mecánicas.

En el capítulo cuatro, se muestra en análisis estadístico de varianza (ANOVA) que pretende mostrar y corroborar de esta manera, cuales de los resultados son los más confiables tomando como base todas las combinaciones establecidas en el diseño de experimentos con el fin de determinar las variables adecuadas para el proceso de soldadura de los aros de acero.

Por último, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones que se obtuvieron luego de realizar esta investigación; de igual forma se muestran algunas recomendaciones para trabajos futuros relacionados con los procesos de soldadura similares al de destello.

1. MARCO TEORICO

1.1. RUEDAS DE ACERO PARA AUTOMOVILES

Desde la invención del automóvil, las ruedas de acero han estado vinculadas directamente con su funcionamiento, facilitando su desplazamiento durante largos trayectos y con cargas bastante pesadas. Su evolución no fue tan veloz como la de los automóviles, esto debido a que no se había analizado de manera profunda las propiedades que se podían mejorar para mantener y mejorar características principales de una rueda como son la resistencia, apariencia y peso, estas características deben mantener un equilibrio para que se satisfagan las necesidades de los clientes.

En Colombia, la fabricación de rines de acero para equipo original (OEM) se ha sometido a lo definido por las grandes empresas fabricantes de rines en el mundo, esto debido a que ellos son los que cuentan con las licencias provenientes de las casas matrices propietarias de los diseños de los automóviles y quienes en asocio con los fabricantes de ruedas definen la geometría y los materiales a usar para luego ser entregados a fábricas de países en desarrollo; esto genera dos inconvenientes, el primero es la deficiencia en tecnología para procesar los materiales definidos en los planos, y el segundo es la mala disposición que tienen estas casas matrices para aceptar cambios propuestos por los fabricantes de autopartes en Colombia debido a que las negociaciones ahora se hacen de manera global.

1.1.1. MATERIALES USADOS PARA LA FABRICACION DE RUEDAS

La rueda ha sido un instrumento usado por los hombres desde la antigüedad para movilizar fácilmente cargas ya sea como una herramienta o para ensamblarla y utilizarla en medios de transporte como coches o carruajes. Se tiene conocimiento de uso en coches y carruajes desde tiempos cercanos a los 4000 años A.C. en la Mesopotamia y en Europa Central y su desarrollo estuvo asociado con la domesticación del caballo que se empleó como animal de tiro para halar los coches. La figura 1, muestra la primera representación bien referenciada de un vehículo de ruedas (en este caso un carro con cuatro ruedas y dos ejes) que está representado en la olla Bronocice (Bronocice pot) correspondiente a los años 3500 a 3350 AC, esta olla de barro fue excavada en un asentamiento de la cultura Funnelbeaker en el sur de Polonia (Anthony, 2007).



Figura 1. Olla Bronocice (Bronocice pot) correspondiente a los años 3500 a 3350 AC (Anthony, 2007)

Desde sus inicios, se empleó la madera como materia prima para su construcción, estas se fabricaban de un disco de madera al cual se le perforaba un agujero en el centro para ensamblar el eje; en los años 1200 A.C. la estructura maciza de madera, fue reemplazada por la rueda con radios fabricada de la misma madera como se puede ver en la figura 2, con una mejora en la disminución del peso lo que permitió que los coches fueran más livianos.



Figura 2. . Rueda clásica de radios del segundo milenio AC (Zambil)

La inclusión de una especie de llanta alrededor de la rueda fue hecha hacia el siglo primero A. C., este recubrimiento exterior por lo general era metálico y permitió que fuera más durable. Para este momento, surgieron nuevos avances relacionados con el agujero central de la rueda y su función de soportar el eje. En algunas ocasiones, se incluyeron cojinetes de madera o bronce lo que permitía que el rodaje fuera

suave y que la pieza durara un poco más, esto se desarrolló en los pueblos celta y romano. En otros lugares de Europa, se incorporaron rodillos de madera que permitieron que la rueda girara con mayor facilidad disminuyendo la fricción entre el eje y la rueda.

Con el uso masivo de los metales y la invención del neumático, en el siglo XIX se evidenció un auge en el diseño y construcción de ruedas, estas pasaron de ser fabricadas en madera, a usar materiales como el hierro y el acero o materiales no ferrosos como el aluminio o el magnesio, muestra de ello se puede ver en la figura 3.



Figura 3. Vehículo antiguo con neumáticos. (Bolan, 2003)

Desde este punto, el desarrollo de la rueda ha estado asociado al desarrollo de los vehículos. Esto ha hecho que la exigencia en resistencia vaya en aumento, la reducción en peso sea importante para evitar el consumo excesivo de combustible y la apariencia sean ítems que generan el uso de materiales que permitan cumplir con estas tres características.

1.1.2. ACEROS USADOS PARA LA FABRICACIÓN DE RUEDAS DE AUTOMOVIL

Desde sus inicios, el acero ha sido un material que se ha empleado ampliamente en la fabricación de ruedas. Hacia los inicios de los años 1900's se fabricaron ruedas de tipo estampado y con radios, imágenes de ello se pueden ver en la figura 4 y figura 5 (Heck, 2004).



Figura 4. Rueda de acero estampada (Heck, 2004)



Figura 5. Rueda con radios de acero. (Heck, 2004)

La edad del acero se ha denominado por parte de algunos fabricantes de rines, al periodo comprendido entre 1935 y 1980. Durante este periodo, las ruedas de acero dominaron el mercado en su uso para los automóviles. Desde 1935, las dimensiones de las rueda se redujeron, inicialmente estas eran de un diámetro de 36 pulgadas y cambio a 16 pulgadas, por otro lado los anchos cambiaron de 3 pulgadas a 6 pulgadas. También, se estableció el proceso de estampado para la fabricación del disco o parte central de la rueda y el proceso de rolado para la fabricación de los aros. Estos procesos fueron los que demostraron un mejor comportamiento en lo relacionado con la productividad y economía (Heck, 2004).

Los aceros usados hasta antes de los años 70's fueron en su mayoría aceros de bajo carbono rolados en caliente, en algunos casos hoy día siguen siendo usados para algunas aplicaciones. A continuación se puede ver cuales materiales se usaban para la fabricación de las diferentes partes que conforman una rueda:

- Disco.

- Acero SAE 1012/1015 HRLC
- Decapado y aceitado
- Aro.
 - Acero SAE 1008/1010 HRLC
 - Decapado y aceitado.

Debido a la necesidad de reducción de peso que surgió con la crisis del petróleo a mediados de los años 70's, se vio la necesidad de utilizar otras aleaciones de acero llamados aceros de alta resistencia (HSS por sus siglas en inglés), el uso de estos materiales se extendió a lo largo del mundo y se dividió de la siguiente manera por continentes,

- Norte América.
 - Acero grado 955X / 960Y
 - Endurecimiento por precipitación con adición de Cb (Nb) (Columbio o Niobio) para refinamiento del grano.
- Europa.
 - Aceros grado Dual Phase
 - DP 500. Composición química inicial con Si (Silicio).
- Japón
 - Acero grado SAPH 45 – 60 HSLA

La demanda de los aceros de alta resistencia junto con el requerimiento de mantener la formabilidad como requisito indispensable para su uso, llevó a que la industria del acero en asocio con los fabricantes de ruedas en Norte América, hicieran un primer intento para desarrollar y utilizar aceros del tipo Dual Phase para la producción de estas piezas. Fue así, como a mediados de los años 1970 se utilizó en la producción de rines el acero SAE 980X Dual Phase continuamente recocido, esto significó un gran avance pero trajo consigo problemas debido a inconsistencias en las propiedades de los materiales y a complicaciones con la apariencia en las piezas terminadas, los dos ocasionados por los altos niveles de silicio (Si) en la aleación, estos inconvenientes hicieron que se dejara de lado prontamente (Heck, 2004).

Esta mala experiencia hizo que los fabricantes de rines rechazaran estos aceros y una vez más los aceros microaleados HSLA se convirtieron en el estándar norteamericano para las aplicaciones de bajo peso de ruedas de acero. Mientras tanto, en Europa los aceros Dual Phase Bainíticos se convertían en el estándar de producción para las aplicaciones de rines de bajo peso.

Hacia el 2002 se tenía una distribución en el uso de los materiales y se observa que en Europa se ha hecho intensivo el uso de los aceros Bainíticos para los aros (rims) con una proporción del 40% frente a un 10% en Norte América. Para el disco, se distingue el uso de materiales Dual Phase con un 40% frente a un 5% en Norte América donde predomina el uso de aceros HSLA cercano al 80%. Esto se puede apreciar en la figura 6 (Heck, 2004).

Tanto para los fabricantes norteamericanos como para los europeos, japoneses y ahora último los brasileiros, se hizo una necesidad retomar el uso de los aceros Dual Phase, pues en el mercado de las

ruedas para equipo original se observó un incremento en el uso de ruedas en aleaciones de aluminio las cuales presentan ventajas en apariencia y peso principalmente. También se mostró por medio de un estudio independiente realizado por Burke Marketing Research solicitado por el Instituto Americano del Hierro y del Acero (AISI) realizado en el año 2000, que el uso de ruedas de acero estilizadas por parte del público era bien aceptado, esto en contravía de lo que era la percepción en cuanto a que la preferencia del público estaba con las ruedas de aluminio (Force, 2000).

El uso de estos materiales junto con piezas adicionales permite generar formas atractivas para los vehículos actuales que cuentan con diseños vibrantes y audaces. Un ejemplo de estas piezas adicionales son las cubiertas adheridas por diferentes métodos a la superficie de las ruedas como se ve en el siguiente ejemplo de la figura 7.

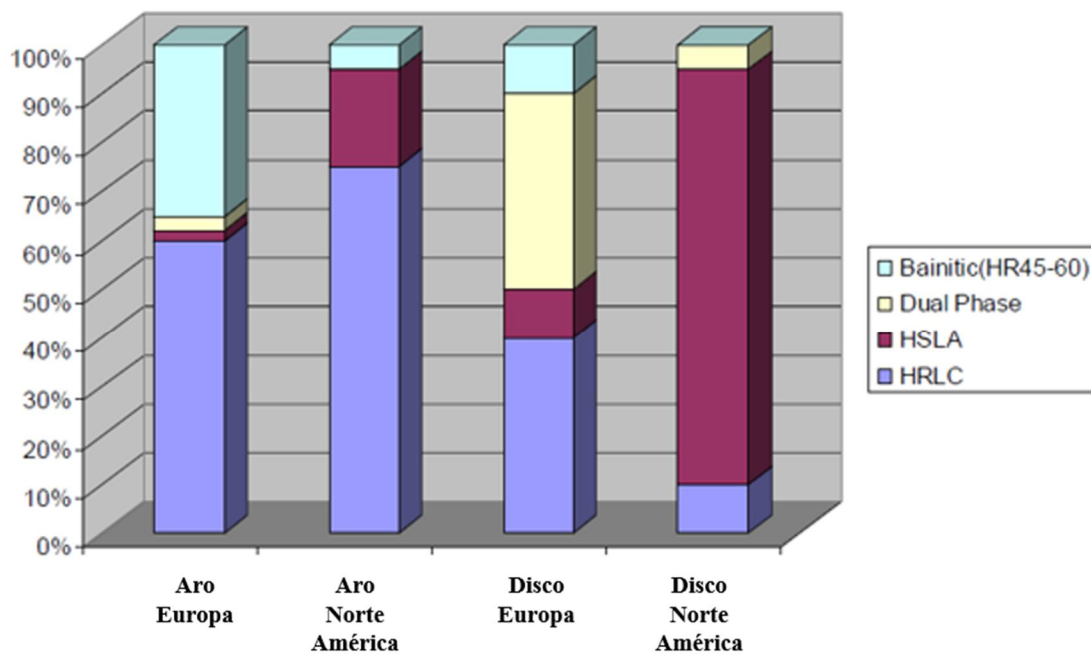


Figura 6. Grados de acero usados en fabricación de ruedas en el año 2002. (Gonzaga, 2011)

Finalmente, y reforzando la necesidad de disminución de peso de las ruedas, se puede ver en la figura 8, una gráfica donde se ve como a través de los años desde 1970 se ha disminuido el peso de las ruedas, frente a un incremento de la resistencia a la tensión de los materiales; allí se muestra la evolución hasta lo esperado del año 2012 (Gonzaga, 2011)



Figura 7. Cubierta plástica usada en ruedas de acero de 5 brazos (five spoke wheels) (Gonzaga, 2011)

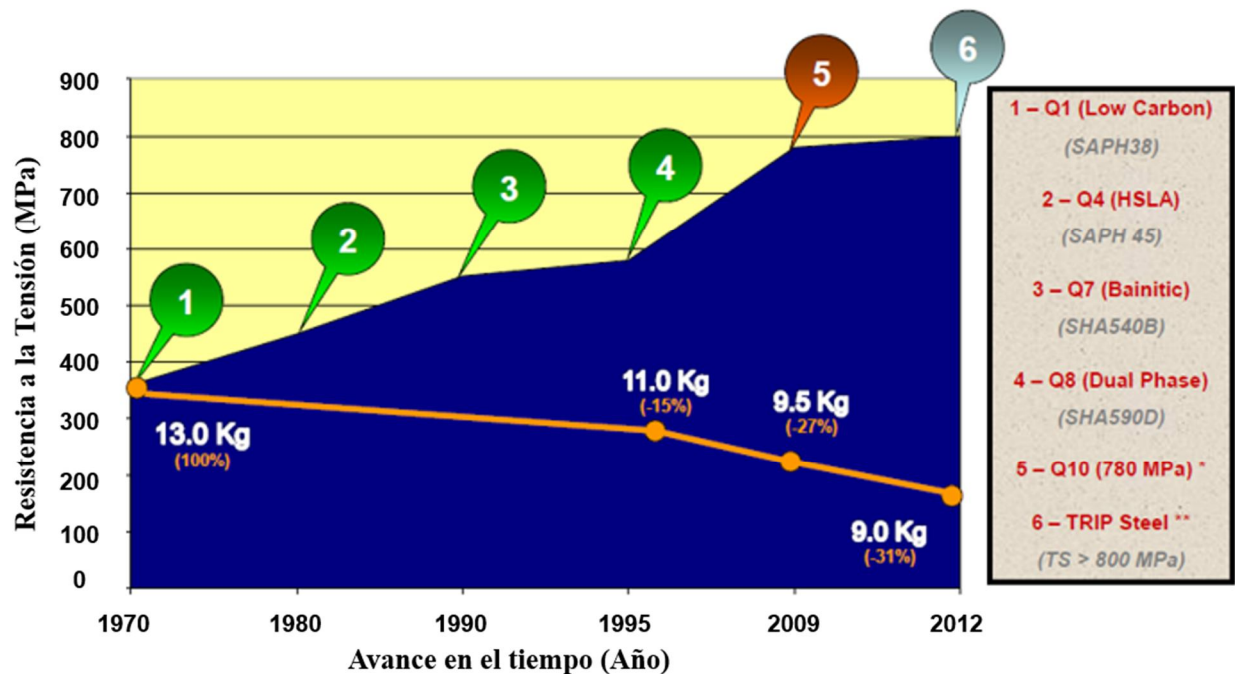


Figura 8. Disminución de peso y aumento de resistencia de los aceros usados en la fabricación de ruedas. (Gonzaga, 2011)

1.2. PROCESO DE FABRICACION DE AROS PARA RUEDAS DE ACERO

El proceso de fabricación de las ruedas de acero, ha progresado con el paso de los años, este progreso no ha sido debido a algún cambio en la forma de las partes, ya que estos no han sido sustancialmente modificados recientemente, especialmente el aro que su forma la debe a estándares internacionales como lo son los de Europa - The European Tire and Rim Technical Organization (ETRTO, 2008), Norte América - The Tire and Rim Association (TRA, 2010) o Japón - Japan Automobile Tire Manufacturers Association

(JATMA, 2009). Su progreso se ha visto en el tipo de maquinaria o tecnología usada para su fabricación la cual ha evolucionado a grandes pasos debido a la necesidad de reducir los costos y aumentar la productividad de las plantas que fabrican ruedas, esta mejora en tecnología también se genera por el uso de materiales diferentes que buscan reducir el peso de las ruedas. Dentro de esta mejora en maquinaria se destaca la de la empresa Hess Industries con soldadores de corriente DC de frecuencia media (HESS, 2011).

Una breve descripción de lo que es una rueda la podemos ver en la figura 9, allí se muestran las dos partes que la constituyen, la parte llamada aro tiene la función principal de soportar la llanta, mantenerla inflada y transmitir la potencia del motor a la llanta; la otra parte es llamada disco y su función principal está asociada con la fijación o sujeción de la rueda al cubo o eje del carro por medio de los pernos de fijación. Estas dos piezas se unen por medio de soldadura de aporte GMAW aplicada de manera automática o semiautomática y su función es mantener juntas las dos partes principales.

A continuación, se explicará de manera breve los diferentes pasos que se usan para la fabricación de aros de rueda de acero, pieza en la cual se centra este documento.

Esta descripción se ha tomado de la experiencia de más de cincuenta (50) años que Colombiana de Frenos S.A. COFRE tiene en la fabricación de ruedas de acero. Por otro lado, esta experiencia de COFRE se ha complementado con los procesos planteados por las empresas fabricantes de maquinaria para la producción de aros para ruedas de acero, dentro de estas fábricas se encuentran Hess Industries, Inc. (HESS, 2011) y Fontijne Grotnes B.V. (FONTINE-GROTNES, 2011); igualmente, se han tomado de referencia aquellos fabricantes que han definido los procesos de fabricación de rines desde su inicio, dentro de estos podemos encontrar a Hayes Lemmerz International (HLI, Inspection Plant for rim line, 2003) (HLI, Procedure to Design Rim, 2004).



Figura 9. Partes que conforman la rueda. Aro y disco.

1.2.1. PROCESO DE FABRICACION DEL ARO.

El proceso de fabricación de un aro de una rueda de acero, que se ha establecido en Colombiana de Frenos S.A. como parte de su proceso productivo, inicia de una lámina enrollada, aceitada y decapada que se corta en láminas pequeñas de una medida que puede ser manipulada de una mejor manera; estas láminas luego se cortan en tiras angostas y largas cuya área superficial corresponde a la requerida para obtener las dimensiones del aro a fabricar, a esta pieza se le llama tira. Posterior a esta operación, se inicia con la fabricación del aro como se puede ver de manera esquemática en la figura 10.

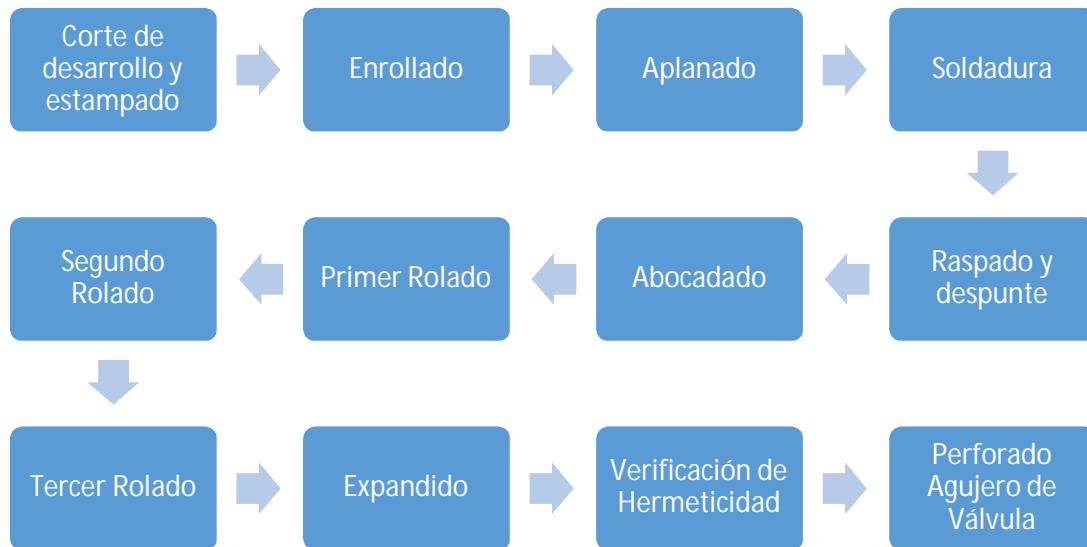


Figura 10. Proceso de fabricación de un aro de acero.

Una breve explicación de cada paso, se hará a continuación,

- Corte de desarrollo y Estampado. Esta operación corresponde al corte de la longitud de la pieza que se requiere para obtener un aro al final del proceso, de igual forma se realiza el estampado de identificación solicitada por los clientes.
- Enrollado. Una vez se tiene la tira de la dimensión del desarrollo adecuada, la tira se introduce en un enrollador que genera un cilindro con los extremos separados.
- Aplanado. En esta operación los extremos de la tira enrollada se nivelan y se alinean lo que es necesario para que el proceso de soldadura tenga buenos resultados ya que uno de los factores importantes es la alineación de las caras antes y después del proceso de soldadura.
- Proceso de soldadura. El proceso de soldadura utilizado en la fabricación del aro corresponde al tipo de soldadura por resistencia, es decir no se aporta material para lograr la junta. El proceso de soldadura a tope por destello, se ejecuta en una máquina soldadora a tope por destello con una fuente de poder AC.
- Raspado y Despunte. El raspado se hace para eliminar el material sobrante del proceso de soldadura, este se ejecuta sobre la cara superior e inferior de la banda enrollada y soldada. El despunte se hace en los costados de la banda soldada. Este es el proceso final para el alistamiento de la banda, luego de este proceso se inicia el conformado en frío con el

- abocardado, luego se hacen tres etapas de rolado y finalmente se hace un calibrado de las dimensiones, luego se verifica la hermeticidad del aro y se perfora el agujero para la válvula.
- Abocardado. Esta operación inicial del trabajo en frío, deforma los extremos de la banda soldada para facilitar su conformación posterior en los rolados.
 - Rolados y Expandido. Los rolados están compuestos por tres operaciones llamadas primera, segunda y tercera que a través del paso de la pieza por estas se va dando forma al aro. Durante estas operaciones, el material sufre laminación y trabajo en frío que genera esfuerzos sobre la soldadura. Ya en el expandido se calibra las dimensiones finales del aro por medio de un molde que tiene la forma y con su movimiento acomoda el material por medio de un proceso de expansión; en esta operación la junta soldada se prueba al máximo y así se puede evidenciar que esta se ejecutó de manera apropiada.
 - Verificación de Hermeticidad. Esta inspección permite verificar que la soldadura no presente ninguna fuga. Se hace realmente importante conocer si es hermética esta junta debido a que la llanta ensamblada con la rueda debe poseer la propiedad de hermeticidad y cualquier fuga genera malestar en el cliente final ya que ocasiona pérdida de aire en la recámara.
 - Perforado de agujero de válvula. Para finalizar, se perfora el agujero de válvula en la pieza, en este agujero se instalará la válvula que permite el inflado de la llanta.

1.3. SOLDADURA A TOPE POR DESTELLO – FLASH BUTT WELDING (FBW)

El proceso de soldadura a tope por destello es una soldadura plana en la cual las caras opuestas del material son soldados de un golpe, por lo tanto es un proceso extremadamente eficiente. Este proceso se aplica en la soldadura de aros de rueda en la industria del automóvil y para juntar láminas de acero roladas en caliente en la industria de la acería. El mayor problema de calidad de esta soldadura en estas aplicaciones es la fractura de la soldadura. Además de las aplicaciones anteriormente nombradas, se tienen también el uso en líneas de tubería, soldadura de rieles, estructuras marinas y eslabones de cadenas (Ichiyama & Shinji., 2007). De manera similar se utiliza para la fabricación de cerchas metálicas tomando como pieza inicial ángulos de acero estructural (Ziemian, Sharma, & Whaley, 2012). Existe un proceso similar al de soldadura de tope por destello llamado soldadura por recalado - Upset Welding, que ha tomado auge en la fabricación de rines de automóvil, sin embargo la soldadura a tope por destello mantiene una buena popularidad en esta industria (Min, Kim, & Kang, 2000). Los beneficios de la soldadura a tope por destello son su alta velocidad, alta eficiencia, ningún requerimiento de pretratamiento del material base, alta resistencia en las juntas soldadas y finalmente el amplio rango de materiales sobre los cuales se puede aplicar (Ziemian, Sharma, & Whaley Jr., 2008).

1.3.1. Definición y descripción general.

El proceso de soldadura a tope por destello, es un proceso que se ubica dentro de los procesos de la soldadura por resistencia (AWS, Chapter 27. Flash, Upset, and Percussion Welding., 1969).

Este es un proceso de soldadura por resistencia de dos etapas que produce la unión soldada de manera simultánea en toda el área de las dos superficies a soldar que inicialmente se encuentran separadas. La primera etapa es la generación de chispas donde el calentamiento se genera por la resistencia al flujo de

corriente eléctrica entre las dos superficies a soldar, esta resistencia genera un arco eléctrico entre las dos superficies lo que a su vez genera chispas o destellos. La segunda etapa llamada recalcado (upset), se realiza cuando las dos superficies que se encuentran separadas, una vez calientes a temperatura de fusión se juntan de manera brusca por medio de una fuerza axial con una velocidad controlada (Ziemian, Sharma, & Whaley, 2012).

En términos generales, es un proceso de fusión y recalcado. Este proceso es capaz de producir juntas soldadas con resistencia igual o superior a la del material base (Latime & Matteson, 1993).

La figura 11, se muestra de manera esquemática una operación de soldadura a tope por destello.

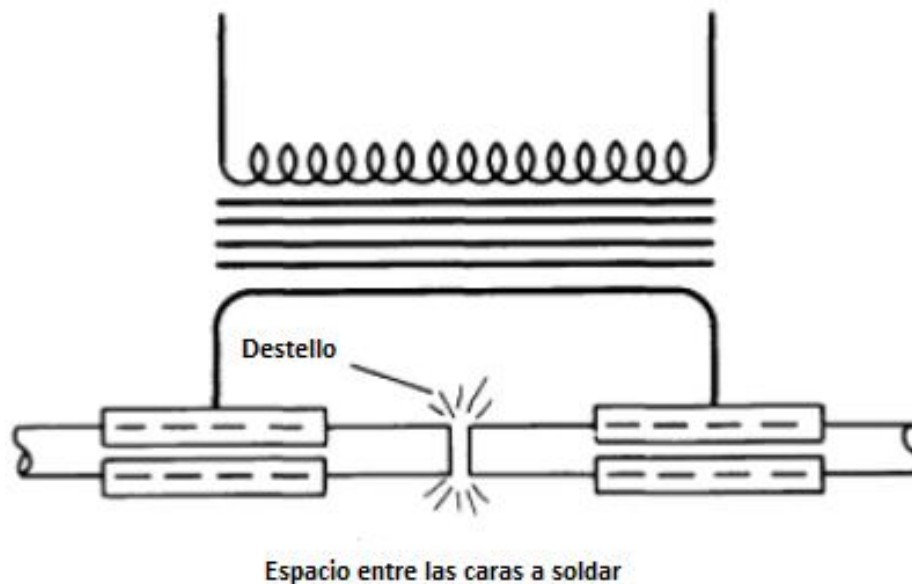


Figura 11. Ajuste típico de la soldadura a tope por destello con una separación entre las caras de dos barras a soldar.
(Latime & Matteson, 1993)

1.3.2. Principios de operación de un soldador a tope por destello.

A continuación se listan los pasos que comprenden el ciclo de soldadura a tope (AWS, Chapter 27. Flash, Upset, and Percussion Welding., 1969),

- Cargar pieza en la máquina.
- Sujetar la pieza con las mordazas.
- Aplicar el voltaje para ejecutar la soldadura.
- Inicio de la fase de destello.
- Aplicación del recalcado (upset)
- Corte de la corriente de soldadura.
- Liberación de pieza.
- Retorno del carro móvil a la posición inicial.

- Reinicio del ciclo.

La figura 12, muestra este proceso de manera esquemática.

El material a ser unido es sujetado firmemente con las mordazas de amarre, los extremos de los especímenes son separados por un pequeño espacio. Posteriormente, el carro móvil avanza lentamente hasta hacer que se genere contacto entre dos o más protuberancias minúsculas en las caras a soldar (Kim, So, & Kang, 2009). Estas protuberancias crean un arco eléctrico entre las dos caras lo que a su vez genera calor durante la etapa de destello. El tiempo de destello define el periodo en el cual este arco eléctrico ocurre (Ziemian, Sharma, & Whaley, 2012). Los puntos de contacto llegan a temperatura de fusión de manera repentina debido a este calor generado.

Estos pequeños volúmenes líquidos son expulsados del área de soldadura, lo que genera nuevos cráteres y puntos de contacto que se repiten sucesivamente mientras el carro móvil se acerca al carro fijo y todo queda listo para el proceso de recalcado. El tiempo de destello para las piezas es dependiente de la conductividad térmica del material, la geometría que se tiene y el ciclo de destello (Centinkaya & Arabaci, 2006). El objetivo de esta fase del proceso es obtener una distribución de temperatura en la pieza de trabajo para asegurar una acción correcta de recalcado durante el ciclo de recalcado del proceso de soldadura (Kim, So, & Kang, 2009). En la figura 13, se puede observar un esquema de una sección transversal del resultado de la aplicación de la soldadura a tope por destello.

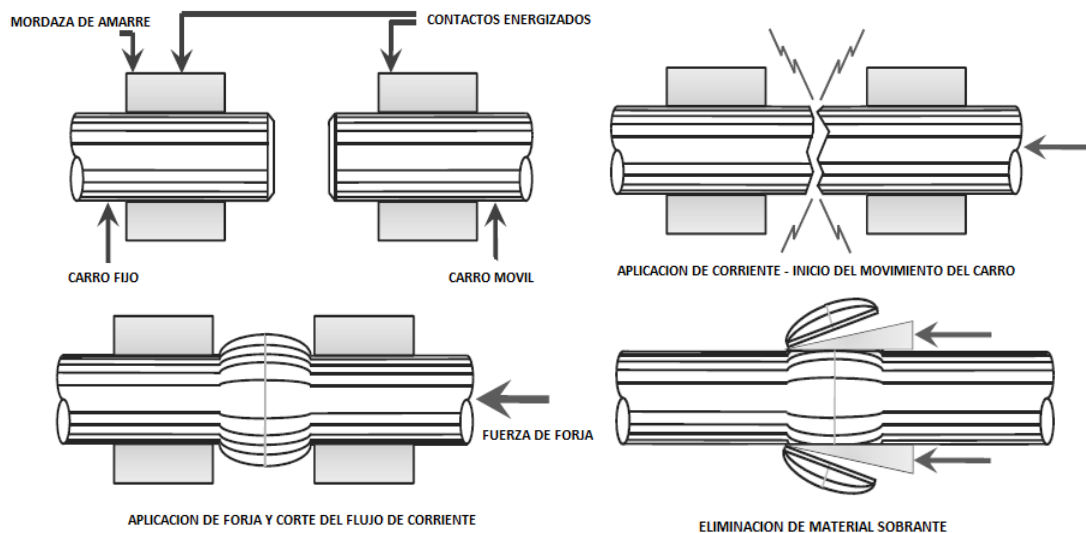


Figura 12. Esquemático del proceso de soldadura a tope por destello. (Kim, So, & Kang, 2009)

Una de las mayores consideraciones para la soldadura por destello es el servicio de la energía eléctrica. Cuando los extremos de la pieza de trabajo se unen bajo una ligera presión, un corto circuito se establece a través del material. Debido a que las superficies de contacto no están perfectamente alineadas, la corriente de corto-circuito fluye a través de la junta sólo en algunas áreas de contacto pequeñas. La gran cantidad de corriente que fluye a través un área relativamente pequeña, produce el calentamiento rápido hasta el punto de fusión. El calentamiento es tan rápido e intenso que el metal fundido es expulsado de

forma explosiva desde el área de la junta. A raíz de esta expulsión, un breve período de formación de arcos se produce (ASM, Flash Welding, 1993).

Después de la expulsión de metal derretido y la generación de arcos posteriores, pequeños cráteres se forman en los extremos de las superficies de contacto. Las piezas están avanzado firmemente uno hacia el otro, y otros circuitos cortos se forman y el metal fundido adicional es expulsado. Este proceso continuo de arcos sucede al azar, allí se presentan arcos, fusión, y expulsión sobre toda la sección transversal de la superficie. Durante el destello, muchas áreas activas se encuentran en diversas etapas de esta secuencia como se puede ver en la figura 14. Las superficies de destello actúan como fuentes de calor, y el perfil térmico se establece principalmente a partir de estas fuentes de calor. Las temperaturas de los destellos están en o por encima del punto de fusión del material y son progresivamente menores mientras más cerca se esté de la superficie de sujeción (ASM, Flash Welding, 1993).

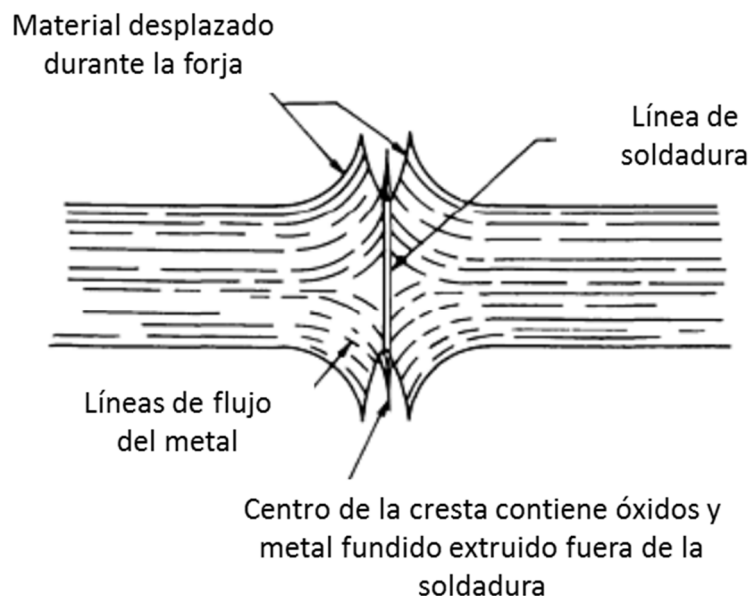


Figura 13. Sección transversal soldadura a tope por destello. (ASM, Flash Welding, 1993)

El calor generado durante la fase de destello es dependiente de algunas variables tanto mecánicas como dimensionales además de la corriente durante el recalcado y la duración del destello. Estos requerimientos térmicos definen el perfil térmico que es requerido. Cuando este perfil térmico es establecido durante el tiempo de destello, el recalcado ocurre de manera adecuada. Este requerimiento térmico también permite definir los valores de la dimensión del recalcado, que por lo general se mantienen de una a dos veces el espesor del material (Ziemian, Sharma, & Powanda, 2009).

Una vez el proceso de destello ha sido completado, el carro móvil se acelera rápidamente por medio de la aplicación de una fuerza axial de una magnitud considerable generando un contacto íntimo entre las superficies que se quieren soldar. Esta parte del proceso se llama recalcado. Una vez se ha terminado el recalcado, las mordazas se abren y se retira la pieza soldada. El material solidificado expulsado de la interface soldada es removida por medio de una máquina raspadora (Kim, So, & Kang, 2009).

1.4. ENSAYOS DE CARACTERIZACION DE UNIONES SOLDADAS POR RESISTENCIA

La filosofía que por lo general se sigue en la fabricación de estructuras y ensambles soldados es asegurar la calidad de la soldadura. Sin embargo, el término calidad es relativo. La aplicación determina que está bien o mal. Generalmente, las soldaduras de buena calidad alcanzan los requerimientos de calidad en cuanto a la apariencia y podrían resistir el trabajo para el cual fueron diseñadas. El primer paso para asegurar la calidad de la soldadura es determinar el nivel que se requiere en función de la aplicación. Un estándar se debe definir en función de los requerimientos del servicio. Los estándares establecidos para verificar la calidad de la soldadura, puede ser diferentes de un trabajo a otro, pero el uso de técnicas apropiadas de evaluación pueden mostrar que los estándares aplicables se alcanzan. Sin importar el estándar de calidad, todas las soldaduras deberían ser inspeccionadas, aun si esta solamente implica que el soldador observe su trabajo una vez ha terminado una aplicación. Una soldadura que presenta una buena apariencia en la superficie es muchas veces un indicador de que la soldadura es de alta calidad. Sin embargo, la apariencia de la superficie por sí sola no asegura un buen acabado y calidad interna (Hayes, 1997).

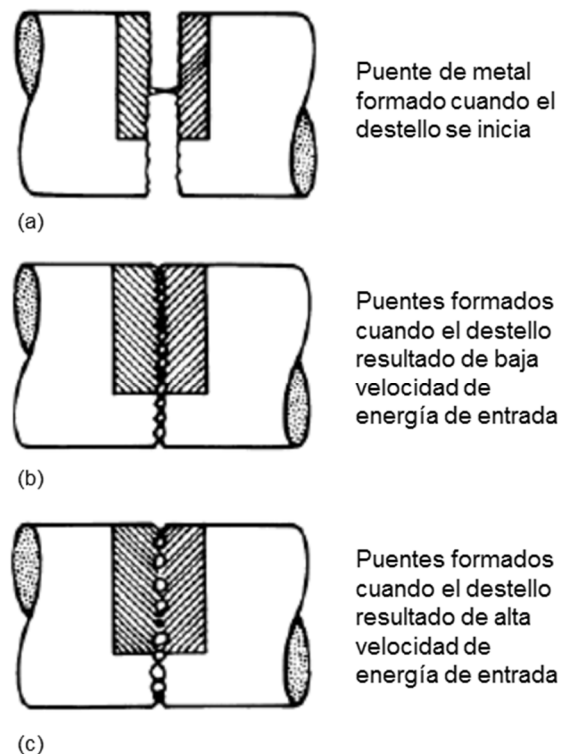


Figura 14. Incremento de los puntos de contacto producidos por la entrada de calor durante la soldadura por destello. (ASM, Flash Welding, 1993)

Para evaluar la calidad de la soldadura es necesario crear una forma cuantitativa basada en sus características. Por lo tanto, una de las características base para su evaluación deberán ser sus características dimensionales. Por lo general, los planos siempre muestran las medidas de la soldadura y las especificaciones dimensionales tales como longitud y posición. El tamaño de la soldadura siempre está relacionada directamente con sus resistencia y desempeño (Ziemian, Sharma, & Whaley Jr., 2008).

De manera general, la tenacidad de la zona afectada por el calor (ZAC/HAZ) de los aceros de alta resistencia, está ampliamente definida por el calor generado en la soldadura y la composición química del acero. Sin embargo, en el caso de la soldadura a tope por destello (FBW), la cual es un tipo de soldadura de presión, la tenacidad de la soldadura está influenciada por muchos factores que son difíciles de interpretar (Ichiyama & Shinji., 2007).

La inspección visual y superficial sin embargo, no es suficiente. El descubrimiento de discontinuidades de la soldadura también es importante porque las imperfecciones dentro o adyacentes a la soldadura puede evitar que la soldadura alcance su función prevista. El número de discontinuidades permitido o no para una determinada aplicación alguna vez es obtenido de códigos o estándares (Barbosa, Dille, Delplancke, Rebello, & Acselrad, 2006). Además de la cantidad, la localización y distribución de las discontinuidades detectadas puede ser crucial y puede resultar en un fallo prematuro de la soldadura mediante la reducción de la resistencia o producir concentradores de esfuerzo dentro del componente soldado (Wang, Shi, Lei, & Tian, 2005).

Los defectos de la soldadura a tope por destello se pueden dividir así, mecánicos (falta de alineación de las piezas, raspado profundo, dados de soldadura quemados), zona afectada por el calor (grietas de Hook, pérdida de dureza por cambio de fase) y de línea central (soldadura fría, punto plano, poros, agujeros, grietas) (AWS, Chapter 27. Flash, Upset, and Percussion Welding., 1969).

Igualmente, se puede presentar un incremento en la dureza de la zona soldada que puede ser atribuida a la deformación de la operación de recalcado. Por otro lado, la resistencia de la soldadura y la presencia de defectos son el resultado de algunos factores de proceso como corriente de recalcado, duración del tiempo de chispeo y la distancia de recalcado (Ziemian, Sharma, & Whaley, 2012).

Se ha confirmado que aunque la calidad de la soldadura en cuanto a propiedades mecánicas fuese satisfecha completamente, los defectos en la soldadura podrían aparecer (Kim, So, & Kang, 2009) (Ichiyama & Shinji., 2007).

1.4.1. Inspección y pruebas.

La inspección visual es el método más usado para inspeccionar la calidad de las soldaduras a tope por destello. Esta se debe ejecutar preferiblemente luego de eliminar las proyecciones que deja el chispeo sobre la superficie y el exceso del material en la superficie generado por el proceso de recalcado. Otros métodos de inspección no destructiva se usan con diferentes niveles de éxito, ninguno de estos ha podido detectar todos los defectos de manera efectiva. Por ejemplo, la inspección de partículas magnéticas indica la presencia de grietas, pequeñas inclusiones y discontinuidades, lo que es obvio es que esta inspección solamente se puede hacer sobre materiales magnéticos lo que lo limita demasiado para su uso sobre la soldadura a tope. Otros métodos de inspección son los que usan corrientes de Eddy, ultrasonido y líquidos penetrantes. El uso de radiografía para detectar defectos en este tipo de soldadura no es del todo

satisfactorio puesto que se ha evidenciado que pequeños defectos que afectan el desempeño de la soldadura no son detectados por este método. En la mayoría de los casos, y como sucede en el proceso de soldadura de los aros de acero, la mejor forma de verificar la soldadura se obtiene durante los procesos posteriores donde la soldadura se somete a un esfuerzo más allá del límite elástico del material durante las operaciones que definen el tamaño y la forma de la pieza. El examen macrográfico es satisfactorio para determinar si las condiciones de puesta a punto de la máquina están bien determinadas. Sin embargo, debido a que esto toma demasiado tiempo no se tiene como una inspección regular. Por otro lado, cuando se utilizan máquinas automáticas, es realmente importante que la puesta a punto de la máquina este realizada de manera adecuada puesto que al ser de funcionamiento automático, el operario no tiene oportunidad de corregir algún parámetro que influya tanto en las condiciones de soldadura como en la calidad de la soldadura (AWS, Chapter 27. Flash, Upset, and Percussion Welding., 1969).

Los métodos de evaluación no destructiva hacen posible verificar el cumplimiento de las normas de forma continua mediante el examen de la superficie y bajo la superficie de la soldadura y el material base circundante. Cinco métodos básicos son usualmente usados para examinar las soldaduras terminadas: visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonidos y radiográficos (rayos X). El creciente uso de la informática junto con algunos métodos proporcionan una mejora de la imagen, y permite en tiempo real y o cerca de la visualización en tiempo real, inspecciones comparativas. Una revisión de cada método, ayudará a decidir qué proceso o que combinación de procesos se pueden usar para un trabajo específico y la realización de un examen de forma más eficaz. Sin importar las técnicas de inspección usadas, tomando en consideración las 5 P's de la calidad de la soldadura se puede reducir de una inspección a una actividad rutinaria de verificación. Entonces, el propósito de los métodos no destructivos serviría como un chequeo para mantener las variables dentro de los valores especificados y la calidad de la soldadura dentro de los estándares (Hayes, 1997).

1.4.2. Ensayos de caracterización.

De acuerdo con la ASM (ASM, Flash Welding, 1993), varios ensayos sobre las piezas soldadas se han desarrollado a través de los años. Algunos de estos se usan de manera extensa y otros se limitan a algunas aplicaciones específicas. Aquí podemos ver algunos de estos ensayos que aplican a la soldadura a tope por destello y el estándar que se tiene de referencia para su evaluación:

❖ Ensayos destructivos.

○ Ensayos mecánicos.

- Resistencia a la tensión (AWS, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, 2010). Este ensayo da información de la resistencia y ductilidad de los materiales bajo esfuerzo de tracción uniaxial. Esta información será útil cuando se puede comparar con resultados de otros materiales, para el desarrollo de nuevas aleaciones, control de calidad, y el diseño bajo ciertas circunstancias. Este ensayo se realiza en una máquina de ensayos de tracción; las probetas son sujetadas a los carros de la máquina por medio de unos sujetadores que sostienen la pieza durante el desarrollo del ensayo de tracción (ASTM, 1991)
- Prueba de doblez. Este ensayo mide la ductilidad de una junta soldada así como su capacidad para resistir el desgarro y la presencia de discontinuidades en la

superficie de tensión. Se realiza sobre un espécimen que es guiado en el proceso de doblado por medio de un dispositivo que emplea unos soportes y un émbolo (AWS, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, 2010).

- Ensayos Metalográficos.
 - Ensayo de Macroexamen. Las soldaduras son usualmente examinadas a una baja magnificación con el fin de observar un área mayor en el momento de la inspección. (Roper, 1985).
 - Ensayo de Macroataque. Es un procedimiento de inspección que se usa para revelar ciertos aspectos de la calidad y la estructura de un acero sometiendo a la acción corrosiva de un ácido, con el fin de examinarlo visualmente o con pocos aumentos (Benscoter, 1985).

❖ Ensayos no destructivos.

- Inspección visual. La inspección visual es una técnica de ensayo no destructivo que proporciona un medio de detectar y examinar una variedad de defectos superficiales, tales como corrosión, contaminación, acabado de la superficie, y discontinuidades superficiales en las articulaciones (por ejemplo, soldaduras, juntas, conexiones de soldadura y uniones adhesivas) . La inspección visual es también el método más ampliamente utilizado para la detección y el examen de grietas en la superficie, que son particularmente importantes debido a su relación con los mecanismos de fallo estructural. Incluso cuando se utilizan otras técnicas no destructivas para detectar grietas en la superficie, la inspección visual a menudo proporciona un complemento útil. Por ejemplo, cuando se realiza el examen de corriente de Foucault de la tubería de proceso, la inspección visual se realiza a menudo para verificar y examinar más de cerca la perturbación de la superficie. Dada la amplia variedad de defectos de superficie que puede ser detectable mediante examen visual, el uso de la inspección visual puede abarcar diferentes técnicas, dependiendo del producto y el tipo de defecto superficie que está siendo monitorizado. Los métodos de inspección visual implican una amplia variedad de equipos, que van desde el examen a simple vista a la utilización de los microscopios de interferencia para medir la profundidad de los arañazos en el acabado de superficies finamente pulidas o bañadas (ASM, Visual Inspection, 1989)
- Inspección con líquidos penetrantes. Es un método no destructivo que revela discontinuidades que están abiertas sobre superficies sólidas y no porosas. Se pueden usar para observar un amplio rango de defectos que se pueden encontrar independientemente de la configuración de la pieza y de la orientación de los defectos. Este es un proceso simple de usar y controlar (ASM, Liquid Penetrant Inspection, 1989).
- Inspección por radiografía. La radiografía se utiliza para detectar las características de un componente o conjunto que exhiben una diferencia en la densidad de espesor en comparación con el material circundante. Las grandes diferencias se detectan más fácilmente que las pequeñas. En general, la radiografía puede detectar sólo aquellas características que tienen un espesor apreciable en una dirección paralela al haz de radiación. Esto significa que la capacidad del proceso para detectar discontinuidades

planas tales como grietas depende de la orientación adecuada de la pieza de prueba durante la inspección. Las discontinuidades tales como huecos y las inclusiones, que tienen espesor medible en todas las direcciones, pueden ser detectadas, siempre y cuando no sean demasiado pequeñas en relación con espesor de corte. En general, características que muestran una diferencia de 1% o más en la absorción en comparación con el material circundante puede ser detectado. (ASM, Radiographic Inspection, 1989).

2. METODOLOGIA

La metodología empleada para este estudio, se basó en procesar varias muestras en la máquina soldadora que se tiene en Colombiana de Frenos para el procesamiento de los aros. Estas muestras se procesaron de acuerdo con un diseño de experimentos factorial de 2^3 . De estas muestras se extrajeron probetas para las pruebas de resistencia a la tracción, microdureza y análisis metalográfico. Las probetas de resistencia a la tracción luego fueron examinadas por fractografía para conocer el tipo de rotura que se presentó.

2.1. Equipos

A continuación se describen los equipos usados para la realización de esta investigación, tanto los que tienen que ver con el procesamiento de las probetas como los usados para análisis.

2.1.1. Equipo de soldadura

El soldador empleado para la elaboración de las probetas de esta investigación es un soldador a tope por chisporroteo semiautomático marca Swift-Ohio modelo 91-AA como se ve en la figura 15.



Figura 15. Soldador automático a tope por destello. Marca: Swift-Ohio. Modelo 91-AA.

Este soldador es usado en la fabricación de aros de acero dentro de la línea de rines automóvil. Consta de una parte móvil y una fija. La potencia se obtiene de un transformador AC de 400kVA lo que permite soldar materiales de acero con espesores desde 2.0 mm hasta 5.5 mm y con resistencia mecánica de hasta 600 MPa a la tracción. Las piezas a trabajar se sujetan por medio de amarres mecánicos que generan presión al material de trabajo entre los pisadores y los electrodos como se muestra en la figura 16. Los pisadores están fabricados en acero H13 para trabajo en caliente con tratamiento térmico y una dureza Rockwell C alrededor de 56 HRC; el material de los electrodos es Cobre-Berilio la cual es una aleación de cobre que permite una alta conducción de la corriente necesaria para la soldadura y una buena resistencia al desgaste requerida para el buen funcionamiento de la máquina y la obtención de una buena junta soldada.

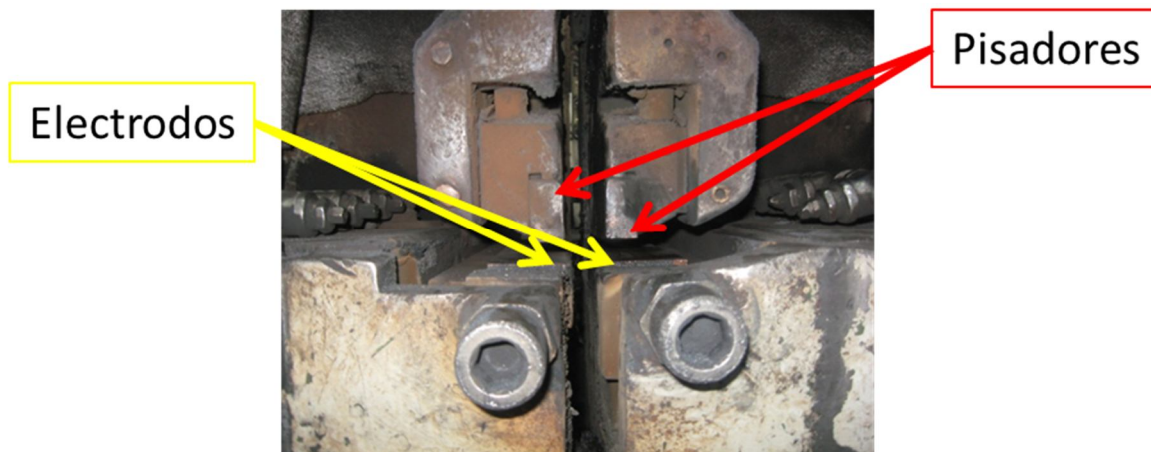


Figura 16. Soldador Swift-Ohio. Detalle de los pisadores y los electrodos.

El mecanismo para el movimiento del carro y la generación del recalcado (upset) es mecánico y funciona por medio de una leva que induce el movimiento, esta se muestra de manera esquemática en la figura 17, esta genera un movimiento horizontal del carro a medida que esta va girando; el perfil de la leva al final tiene un cambio brusco que permite hacer el recalcado.

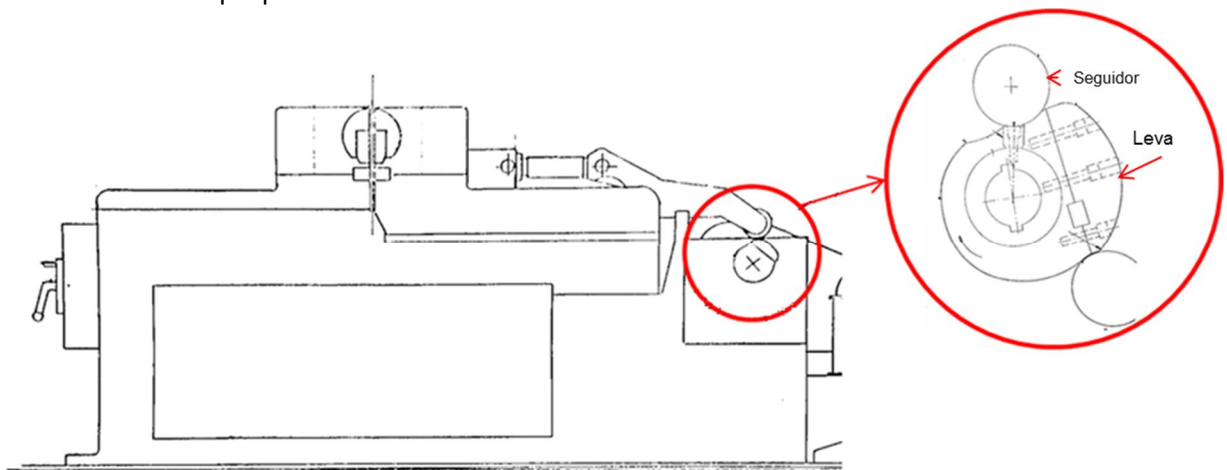


Figura 17. Soldador Swift-Ohio. Esquema leva-seguidor para movimiento de carro movable. (Swift, 1990)

Los parámetros de soldadura que se usaron para el desarrollo de esta investigación se presentan en la tabla 3. Estos parámetros fueron definidos de acuerdo con las necesidades de la investigación y fueron considerados los más importantes que afectan el comportamiento de la soldadura teniendo en cuenta la investigación de (Ziemian et al., 2008), donde se definieron como importantes los parámetros de altura de recalcado, voltaje y tiempo de destello (Ziemian, Sharma, & Whaley Jr., 2008), (Ziemian, Sharma, & Powanda, 2009), (Ziemian, Sharma, & Whaley, 2012); los demás parámetros como son la presión de pisado y la apertura inicial de mordazas, que intervienen en el proceso de soldadura a tope por destello (FBW) se controlaron y se mantuvieron estables para el ensayo.

Los valores de voltaje seleccionados corresponden a los parámetros cercanos a los que normalmente se usan para soldar materiales similares de manera experimental en la planta de COFRE. Estos valores se hacen seleccionando el voltaje secundario en la soldadora por medio de un selector (*tap switch*) que está montado en la máquina, estos puntos están conectados al primario del transformador de soldadura. La corriente en el secundario es directamente proporcional al voltaje primario. En este soldador el tap 1 entrega 8 voltios en circuito abierto y el tap 6 entrega 11,26 voltios (Swift, 1990). Como se observa, los voltajes varían desde 8 voltios hasta 11,26 voltios. Los valores pequeños de voltaje se usan para pequeñas áreas de sección transversal y los valores altos de voltaje se usan para secciones más gruesas (Worldtracker, 2014).

El voltaje aplicado en cada uno de los tratamientos se estableció teniendo como referencia el valor usado para soldar aceros similares. Este voltaje generado por la fuente de poder afecta directamente la densidad de corriente que pasa a través de la junta. La máquina tiene diferentes posiciones de selector que activa más bobinas a medida que se aumenta el número del selector. En la figura 18, se observa el selector de posición del voltaje de la máquina usada en el experimento y un esquema del funcionamiento de la misma.

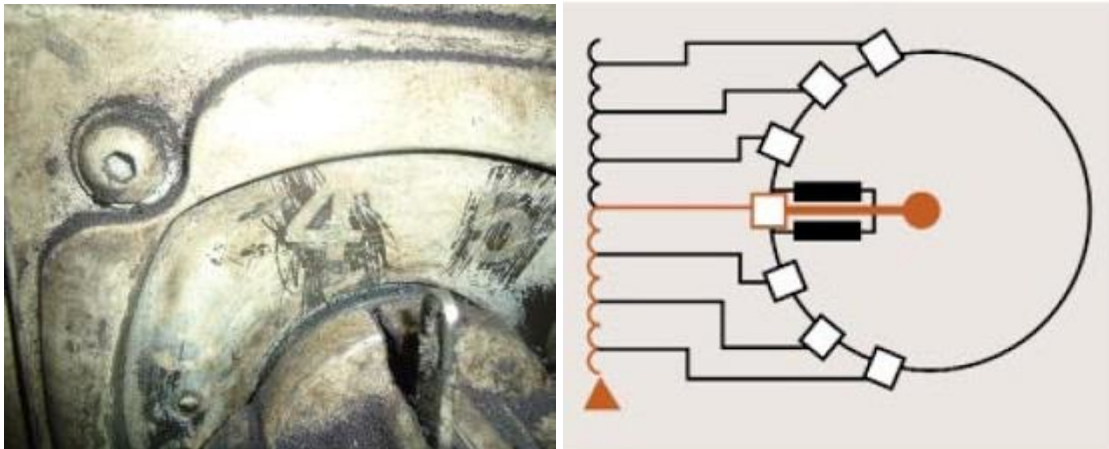


Figura 18. A la izquierda, selector de posición (*tap selector*) soldador Swift-Ohio 91AA del soldador usado en esta investigación, Fuente: Autor. Derecha, Principio eléctrico para un selector eléctrico tipo *on-load tap changer*, Fuente: <http://onloadtapchangersforp>

La altura del recalcado se generó teniendo en cuenta que tan alta se quería obtener la cresta que se genera luego de ejecutar la soldadura. En el proceso de manufactura, el recalcado se hace de manera mecánica cuando el seguidor del carro movable, en la zona final del recorrido, sufre un movimiento rápido

debido a que en esta zona la leva que genera el movimiento oscilante es excéntrica como se observa en la figura 19.

Para hacer que esta cresta tenga diferentes alturas, esta zona final de la leva se puede modificar haciéndose más excéntrica cada vez por medio de la adición de “shims”, de tal manera que el seguidor de la leva sufra un movimiento horizontal cada vez mayor. Este aumento de la cresta conlleva a que se generen problemas dentro de la misma soldadura, es decir se tiene un límite que si es superado, la soldadura queda “fría” lo que indica que toda la zona que se calentó fue expulsada y la junta soldada presentará un comportamiento deficiente en resistencia luego de que se termine de procesar la pieza.

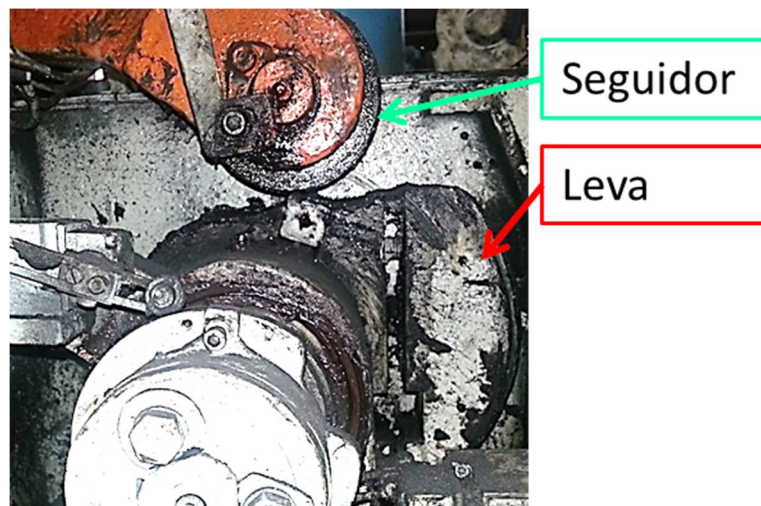


Figura 19. Sistema leva-seguidor soldador Swift-Ohio 91AA.

El tiempo de destello es una de las variables que se pueden controlar durante el proceso de soldadura. El poder controlar este parámetro permite tener diferentes condiciones de soldadura durante el proceso y así evaluar diversas situaciones con respecto del proceso de soldadura y la calidad de la misma. El tiempo de destello es importante en cuanto a que este permite un calentamiento de la zona de soldadura gracias a que se genera un arco eléctrico entre las dos caras como se explicó anteriormente en este documento.

Este tiempo de destello fue generado por medio de la variación de la frecuencia del motor que gobierna el movimiento del carro movable.

Esta variable se controló por medio de un variador de frecuencia que permite hacer más rápido a lento la velocidad del carro movable en la máquina soldadora.

2.1.2. Microscopía

Entre las numerosas técnicas de investigación para estudiar los materiales, la microscopía óptica con sus diversas variaciones, es un método importante para el investigador con el fin de obtener información sobre el estado estructural de un material. En el campo de la metalurgia, la metalografía óptica es la herramienta

de investigación más ampliamente utilizada. El estado de la microestructura de un material de ingeniería como un metal o aleación de metales, o de otro tipo, ya sea de tipo cerámico, polimérico o compuesto, se relaciona directamente con sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, ya que estas se ven influidas por el proceso de obtención y/o el entorno de servicio. Para obtener información cualitativa, y en muchos casos, cuantitativa sobre el estado microestructural de un material, a menudo es necesario preparar una muestra, que revelará la microestructura para la observación. La secuencia básica de pasos para preparar una muestra para observación, parte de cortarla a partir de un material en bruto, luego se pule y brilla la superficie hasta que esta quede libre de defectos, a continuación, la superficie es atacada para revelar la microestructura (Kauffmann, 2003).

Para el análisis microestructural que se realizó en esta investigación y con el fin de conocer en detalle el cambio en la estructura interna del acero SPFH-590 sometido a las diferentes combinaciones de variables de los tratamientos que se ejecutaron en la fase experimental, se llevaron a cabo tanto al material base como a la zona afectada por el calor, métodos de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM).

2.1.2.1. Microscopía óptica

Los microscopios de reflexión de luz fueron desarrollados para observar las superficies de los objetos opacos. Los microscopios ópticos comenzaron su modernización en la medida en que se entendió que las propiedades de los materiales eran dependientes de su microestructura. Actualmente, los instrumentos que permiten magnificaciones muy altas (50x – 2000x), que se emplean en la obtención de imágenes brillados y atacados, emplean sistemas de iluminación vertical que permiten iluminar el espécimen a lo largo del eje óptico del microscopio. Esta iluminación vertical permite eliminar el sombreado de características de superficie, las cuales se ven favorecidas por la iluminación fuera de eje lo que a su vez mejora la resolución alcanzable.

La microscopía, independientemente de la técnica instrumental que se use, tiene como objetivo principal la producción de imágenes visuales las cuales pueden ser analizadas a profundidad por medio de mediciones que cuantifican algún número de propiedades microestructurales como son el tamaño de grano, las fracciones de volumen de las fases, conteo o identificación de microelementos o características microestructurales como maclas, número de inclusiones, área superficial de granos y fases secundarias, y mediciones microestructurales específicas como la curvatura media total de límite de grano en una muestra dada (Kauffmann, 2003).

La verificación por microscopía óptica se realizó con un Microscopio LECO 100X a 800X – software IA32, como se muestra en la figura 20.b., Para el análisis de la microestructura se hicieron tomas micrográficas tanto al material base como a la zona afectada por el calor.

Para la microscopía electrónica de barrido (SEM), se usaron las mismas probetas y se observaron los materiales a diferentes aumentos; al igual que para la microscopía óptica, se evaluó tanto la junta soldada como el material base.

2.1.2.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

El microscopio de escaneo electrónico (SEM), es uno de los instrumentos más ampliamente utilizados en los laboratorios de investigación de materiales y es común en varias formas en las plantas de fabricación. La microscopía electrónica de barrido es medular para el análisis microestructural y por lo tanto importante para cualquier investigación en relación con el procesamiento, propiedades y comportamiento de los materiales que implica su microestructura.

El SEM proporciona información relativa a las características topográficas, morfológicas, distribución de fase, las diferencias de composición, estructura cristalina, orientación de los cristales, y la presencia y la localización de defectos eléctricos. La fuerza del SEM reside en su versatilidad inherente debido a las múltiples señales generadas, sencillo proceso de formación de imagen, rango de ampliación de ancho, y una excelente profundidad de campo (Kauffmann, 2003).

Por otro lado, la técnica más potente para la realización de un estudio de fractografía es el SEM (Surunaree University, 2015). Fundamentalmente, con este proceso se espera entender dos cosas, la primera es conocer como fue la fractura de los metales y la segunda es que tanto afectó el ambiente para que sucediera esta fractura. Este tipo de estudio, permite distinguir dos trayectorias de fractura, ya sea transgranular (a través de los granos) o intragranular (a lo largo de los límites de grano). Sin embargo, sin importar cuál sea la trayectoria de fractura, solamente se distinguen cuatro tipos de fractura como son, ruptura por pequeños agujeros (dimple ruptura), rotura por planos (cleavage), rotura por fatiga y ruptura decohevisa.

En la figura 20.a., se observa una imagen del equipo SEM usado para este análisis.

El equipo empleado en la microscopía electrónica de barrido (SEM) para este estudio tiene las siguientes características,

- Equipo: Microscopio Electrónico de Barrido
- Marca: FEI
- Modelo: Quanta 200 – Metalizador

a)



b)



Figura 20. a). Microscopio Electrónico de Barrido FEI Quantas 200, b). Microscopio LECO 100X a 800X – IA32

2.1.3. Microdurómetro

Los ensayos de dureza estática por indentación por medio de los métodos Brinell, Rockwell, Vickers y Knoop son frecuentemente usados para determinar la dureza. El concepto básico utilizado en todos estos ensayos es medir la resistencia a la penetración de un material cuando se aplica una fuerza a un indentador. Si el material es duro, se presentará una marca del indentador poco profunda o pequeña, por otro lado si el material es suave, se producirá una marca de indentación bastante larga o profunda. Estos ensayos de medición de dureza se clasifican de dos formas ya sea por la medida de la fuerza aplicada al ensayo o el método de medición utilizado. Un test “macro” hace referencia a ensayos donde la carga aplicada es mayor a 1 kg (carga > 1 kg); de manera similar un ensayo “micro” se denomina de esta manera cuando la carga aplicada es menor a 1 kg (carga < 1 kg) (Kauffmann, 2003).

Los ensayos Rockwell y Brinell están incluidos dentro de la categoría macro, mientras que los ensayos Knoop se incluyen en los ensayos de microindentación. Con respecto a las mediciones Vickers, se emplean para ensayos tanto macro como de microindentación. La dureza como tal no es una propiedad fundamental de un material, sin embargo este ensayo es considerado como una herramienta útil para el control de calidad. De esta manera, muchas propiedades se pueden predecir mediante la combinación de los valores de dureza junto con información adicional como por ejemplo la composición de la aleación. A continuación se pueden ver algunas de estas propiedades: resistencia a los abrasivos o al desgaste, resistencia a la deformación plástica, módulo de elasticidad, resistencia a la fluencia, ductilidad y tenacidad a la fractura. Algunas de estas propiedades como la resistencia a la fluencia, tienen relaciones numéricas con los valores de dureza, mientras que algunas como la tenacidad a la fractura están basadas en observaciones de las grietas que rodean las indentaciones (Kauffmann, 2003).

Para esta investigación, el método seleccionado para evaluar la dureza de la ZAC fue el de microdureza Knoop, la cual fue realizada en un microdurómetro Leco LM100 AT del cual se puede observar una imagen en la figura 21.



Figura 21. Microdurómetro LECO LM 100AT.

2.2. Materiales

Los materiales usados para la realización de esta investigación fueron tomados de la línea de producción de aros de acero.

2.2.1. SPFH 590

El acero SPFH 590 es un grado de acero denominado así por la norma JIS G 3134:2006 la cual define los aceros laminados en caliente de alta resistencia en forma de planchas, hojas o tiras con conformabilidad mejorada para uso en la fabricación de autopartes (JSA, 1998). De acuerdo con European Steel and Alloy Grades, este material también es conocido como S420MC según el estándar EN10149-2:1996 Especificación de productos planos laminados en caliente de aceros de alto límite elástico para conformación en frío (European Steel and Alloy Grades, 2013). El acero se enfría hasta la temperatura ambiente después de las etapas anteriores de tratamiento térmico y luego revenido a una temperatura inferior a la temperatura de transformación eutectoide (AC1). El objetivo de estos procedimientos es obtener una combinación ideal de resistencia y tenacidad. El templado es el proceso de calentar la fase de martensita para mejorar la ductilidad y suavizar el acero (Honeycombe & Bhadeshia, 1995). Debido a que las temperaturas y tiempos de enfriamiento son propiedad del proveedor, no se tiene información detallada.

La composición química y las propiedades mecánicas se pueden ver en la tabla 1., estos valores fueron tomados del certificado de materiales del proveedor Baosteel Corporation y en la tabla 2 se puede observar los valores de referencia definidos en el estándar JIS G 3134:2006 para la lámina de espesor de 2,0 a 2,5 mm.

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas del acero SPFH 590

Elemento	C	Si	Mn	S	P	Alt	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	Elo. (%)
% Peso	0,09	0,13	1,69	0,005	0,013	0,031	532	624	22

Tabla 2. Composición química y propiedades mecánicas del acero SPFH 590 según norma JIS G 3134:2006 para lámina de 2.3 mm. (JSA, 1998)

Elemento	C max	Si max	Mn max	S max	P max	Alt min	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	Elo. (%)
% Peso	0,18	0,60	2.00	0,005	0,025	0,031	Min. 590	Min. 420	Min. 22

2.3. Desarrollo experimental

A continuación se explicará cómo se desarrolló experimentalmente este estudio.

2.3.1. Diseño de experimentos

Los parámetros de soldadura que se utilizaron en el desarrollo de esta investigación, fueron definidos por medio de un diseño de experimentos. Este diseño de experimentos se estableció con el fin de investigar cuáles serían las respuestas asociadas con las variables voltaje (posición del selector), altura de recalcado (upset) y tiempo de destello (flashing time) las cuales fueron tomadas para evaluación.

A estas variables de análisis, se les definieron dos niveles de control (alto – bajo) lo que finalmente permitió generar un diseño factorial 2^3 con dos replicas para cada uno de los tratamientos; en la tabla 3, se puede observar la definición de las variables y los niveles en los cuales se trabajará.

Tabla 3. Niveles de los factores para el diseño de experimentos.

Designación	Variable de Proceso	Nivel Bajo		Nivel Alto	
A	Voltaje (posición del selector)	1	VNB	2	VNA
B	Altura del recalcado (upset) mm (altura calzo – mm)	2,3 (5,0)	AFNB	4,6 (10,0)	AFNA
C	Tiempo Destello (flashing time) seg (Vel carro - Hz)	2 (48)	TDNB	4 (30)	TDNA

El número del espécimen asociado con cada uno de las ocho (8) combinaciones de los tratamientos junto con el orden aleatorio con el cual se elaborarán las probetas soldadas se puede ver en la tabla 4.

Para la definición del número de réplicas, es necesario conocer que la cantidad de las mismas afecta la precisión de estimación de las medidas de los tratamientos y la potencia de las pruebas estadísticas para detectar las diferencias entre las medias de los grupos en tratamiento y que el costo de conducir estudios de investigación, restringe las réplicas a un número razonable (Kuehl, 2001). De igual forma en (Ziemian, Sharma, & Whaley Jr., 2008), luego de realizar una cantidad de ensayos de entre 50 y 100 corridas, como resultado se determinó que dos réplicas para este tipo de experimentos es un valor acertado.

Tabla 4. Niveles de los factores para el diseño de experimentos

No. Tratamiento	Combinación Variables	Aleatorización para ejecución
1	VNB, AFNB, TDNB	8
2	VNB, AFNB, TDNA	1
3	VNB, AFNA, TDNA	7
4	VNB, AFNA, TDNB	6
5	VNA, AFNA, TDNA	5
6	VNA, AFNA, TDNB	2
7	VNA, AFNB, TDNA	3
8	VNA, AFNB, TDNB	4

2.3.2. Preparación de las muestras.

Los especímenes fueron preparados usando la línea normal de producción. A continuación se describe como fueron obtenidas.

2.3.2.1. Fabricación de las uniones soldadas.

Las juntas soldadas se obtuvieron por medio del proceso de soldadura de resistencia a tope por destello, de la misma manera como se procesan las piezas que se producen en la línea de producción de aros de rueda de manera habitual. Para facilitar la realización de las probetas soldadas, se decidió procesar el acero siguiendo el flujo normal de fabricación de aros para rueda de automóvil hasta el proceso de raspado de soldadura. Una vez alcanzado este punto del proceso, se retiraron las bandas soldadas y se procedió al corte de las probetas. En la figura 22, se pueden observar algunos de los pasos del proceso de soldadura.

A continuación se listan algunas de las características más relevantes que se usaron para obtener las probetas soldadas que se utilizaron para la realización de las pruebas destructivas y no destructivas:

- El material base utilizado fue acero HSLA microaleado SPFH590 de 2.3 mm de espesor, aceitado y decapado suministrado de manera regular a la línea de manufactura.
- Las uniones soldadas se obtuvieron utilizando un soldador a tope por destello (FBW) modelo Swift-Ohio 91-AA el cual se describió anteriormente
- La junta a soldar es a tope y sin biseles, el borde de la junta para realizar la soldadura corresponde al borde de corte que se obtiene dentro del proceso normal de cizallamiento de la línea de fabricación.
- No se tiene material de aporte puesto que es un proceso de soldadura por resistencia.

- Los parámetros utilizados para realizar esta soldadura fueron los establecidos en las tablas 3 y 4.

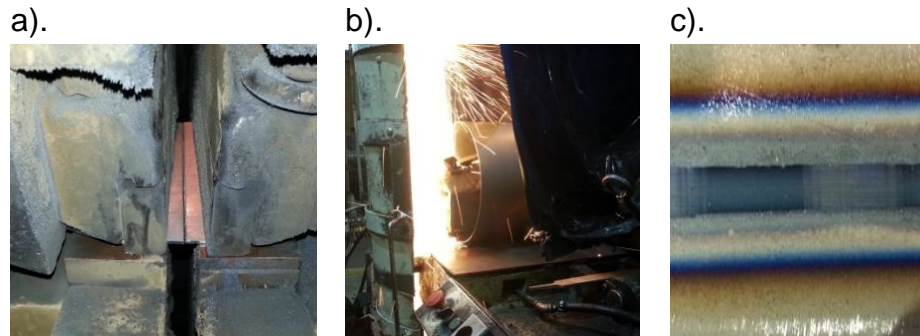


Figura 22. Realización de uniones soldadas. a) Junta lista para ser soldada, b) Ejecución de la operación de soldadura, c) Junta soldada

2.3.2.2. Pulido y brillado.

Luego de la soldadura, las áreas soldadas de interés fueron cortadas por medio de cinta refrigerada, estas probetas pequeñas se tomaron de áreas como las que se pueden ver en la figura 23, luego de esto se montaron en baquelita con la distribución que se muestra en la figura 24. El pulido fue ejecutado en una máquina para pulir probetas con lijas No. 240 hasta No. 600. Finalmente el acabado de brillo se le hizo con alúmina y felpa.

2.3.2.3. Macroataque.

Luego del pulido, a todos los especímenes se les hizo un macroataque, para ello se utilizó Nital al 5% para revelar la microestructura. Los especímenes fueron atacados entre 10 y 15 segundos, luego enjuagados con agua caliente y alcohol y finalmente se secaron con aire comprimido seco.

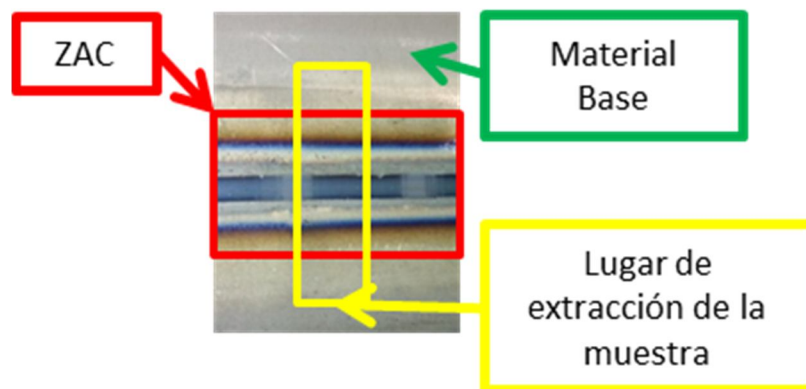


Figura 23. Probeta de soldadura. Base para extracción de material para análisis por microscopía. Detalle en amarillo muestra el lugar de extracción de las muestras para elaborar las probetas de análisis por microscopía; en rojo zona afectada por el calor y en verde material base.

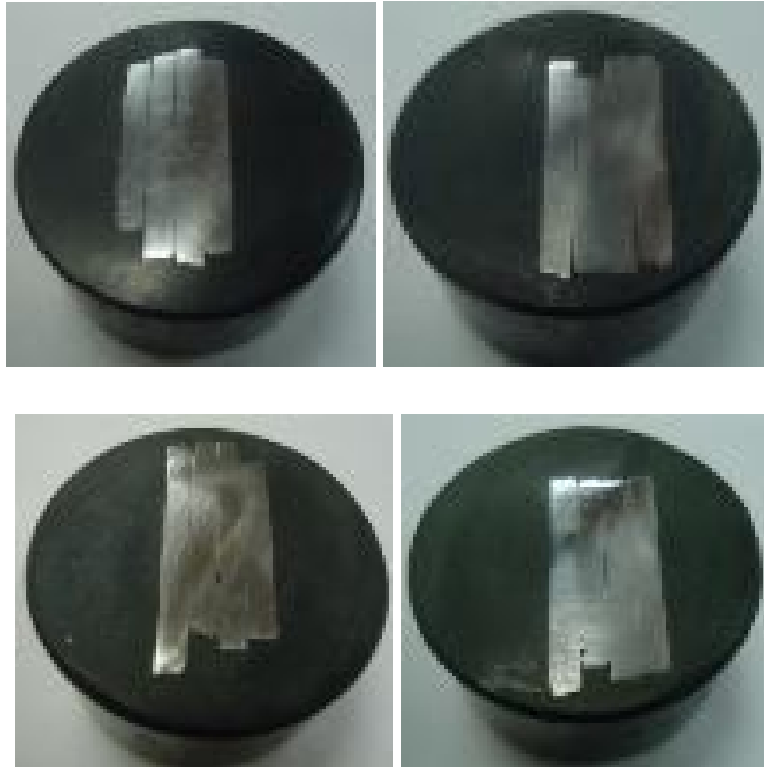


Figura 24. Muestras insertadas en bakelita.

2.3.3. Técnicas de caracterización.

Las técnicas de caracterización empleadas en este estudio se discriminaron en dos partes, ensayos destructivos y ensayos no destructivos.

2.3.3.1. Ensayos destructivos

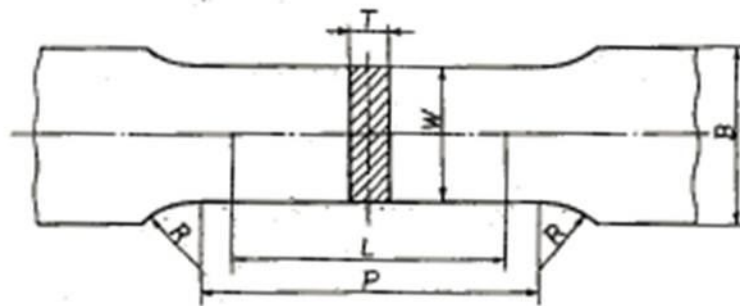
Dentro de los ensayos destructivos se consideraron los siguientes, pruebas de resistencia a la tracción, pruebas de doblez y medición de microdureza.

2.3.3.1.1. Pruebas de resistencia a la tracción.

El comportamiento mecánico de los materiales está relacionado preliminarmente con la respuesta de los mismos a las fuerzas o cargas a las que está sometido. Las fuerzas o cargas que los materiales experimentan en su respectiva aplicación hace necesario que se identifiquen los valores límite permitidos

de carga o fuerza sin que exista falla o deformación permanente. Incluso, en muchos casos es necesario conocer la respuesta de los materiales cuando se presentan cargas cíclicas. También es necesario conocer el comportamiento de los materiales durante el proceso de manufactura. La determinación de la microestructura resultante durante un proceso de transformación es una parte integral del proceso de transformación. Esta es un área que claramente combina la determinación de las propiedades mecánicas con la microestructura. Las propiedades mecánicas básicas y las mediciones de resistencia de los materiales se obtienen de ensayos mecánicos estandarizados (Kauffmann, 2003).

Se realizaron probetas para ensayos de tensión del material base y de las juntas soldadas, dos probetas por cada tratamiento establecido. Para las pruebas de material base se elaboraron según lo establecido en la norma japonesa JIS G 3134 (JSA, 1998) debido a que la especificación del material base fue fabricado bajo esa especificación. El esquema de la forma se observa en la figura 25.



W – Ancho	L – Longitud Indicador	P – Longitud Paralela	R – Radio	T - Espesor
25	50	60 Aprox.	15 min.	Espesor material

Figura 25. Probeta resistencia a la tensión. (JSA, 1998)

Las probetas para la prueba de tensión de la junta soldada, se elaboraron de acuerdo con la norma AWS B4.0:2000 (AWS, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, 2010) cuyo esquema se observa a continuación en la figura 26.

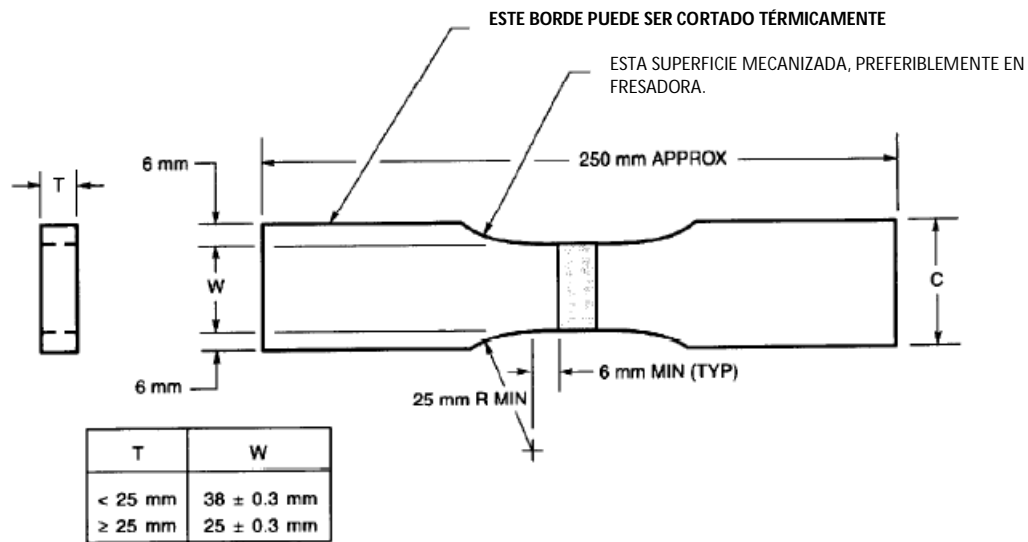


Figura 26. Probeta resistencia a la tensión junta soldada. Figura A.12. (AWS, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, 2010)

En la figura 27, se pueden observar algunas de las probetas que se ensayaron en resistencia a la tracción.

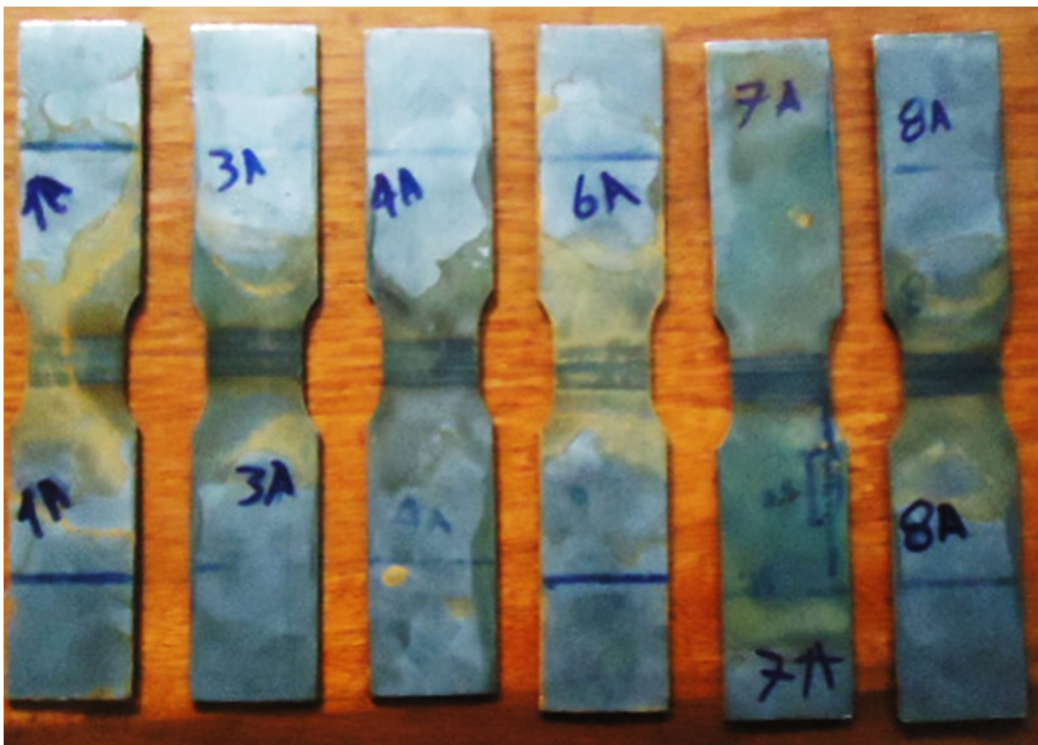


Figura 27. Probetas para pruebas de resistencia a la tracción.

La máquina usada para realizar los ensayos de tracción es una máquina universal de ensayos SHIMADSU – UMH – 50. Durante el ensayo, las probetas fueron alineadas adecuadamente en los sujetadores de la máquina con el fin de evitar que se presentaran esfuerzos de flexión sobre la probeta ensayada. La velocidad de desplazamiento fue de $5 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. La fuerza que se requirió para mover los sujetadores de los extremos fue medida al igual que la elongación del espécimen probado. Los diagramas de esfuerzo-deformación fueron calculados teniendo en cuenta la dimensión de la probeta ensayada y la curva de fuerza-desplazamiento generada por el software de la máquina.

2.3.3.1.2. Prueba de doblez.

Las probetas para realizar las pruebas de doblez se elaboraron tomando como referencia la norma AWS B4.0:2000 (AWS, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, 2010). Al igual que en los ensayos de tensión, se generaron 2 probetas por cada tratamiento definido.

En la figura 28, se puede observar el esquema de la probeta elaborada para este ensayo mecánico.

Las probetas usadas para este ensayo se montaron en un dispositivo para realizar las pruebas de doblez que está diseñado y fabricado de acuerdo con la norma AWS B4.0:2000 (AWS, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, 2010) del cual se muestra el plano en la figura 29.

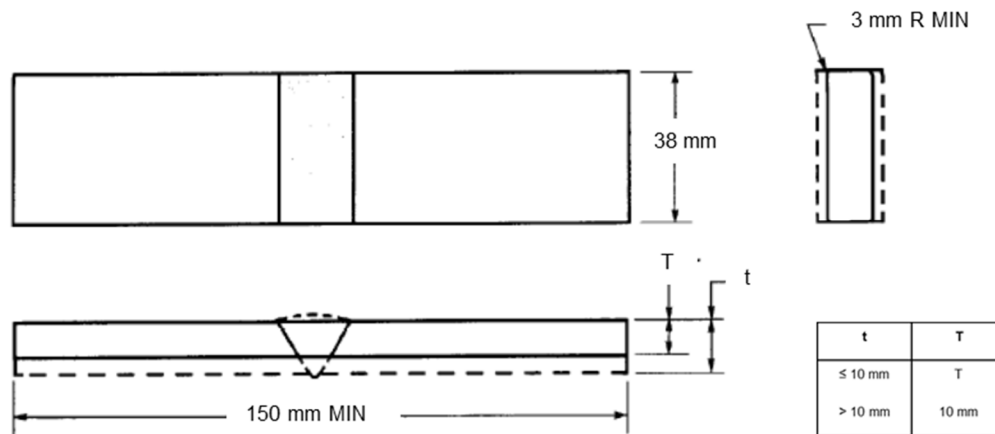


Figura 28. Esquema probeta prueba de doblez. Figura A.7. (AWS, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, 2010)

En la figura 30, se puede observar una foto del dispositivo fabricado y montado en una prensa hidráulica listo para llevar a cabo el ensayo.

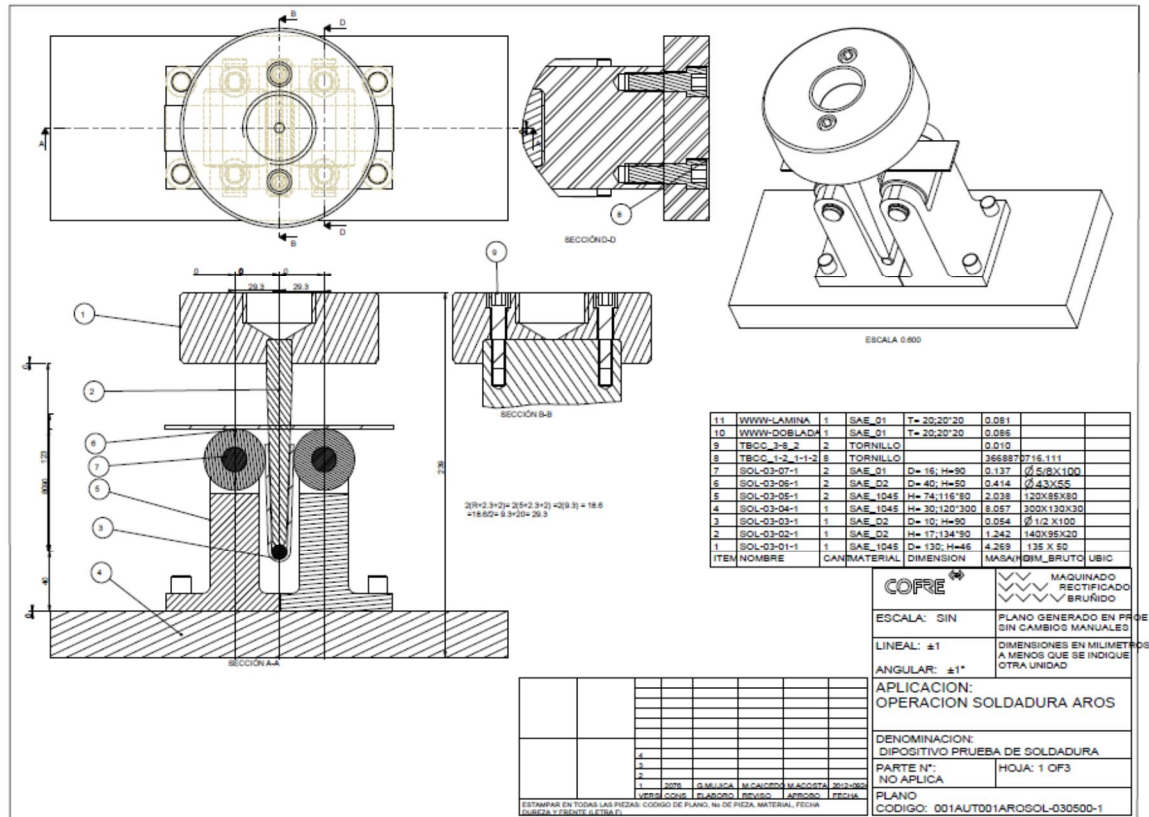




Figura 30. Dispositivo de ensayos de doblez.

2.3.4. Ensayos no destructivos.

La razón fundamental para inspeccionar una soldadura es con el fin de determinar si su calidad es suficiente para su aplicación prevista. Para evaluar la calidad de una soldadura, es necesario formar métricas cuantitativas sobre la base de sus características. Por ejemplo, una base para la calidad de la soldadura podría ser sus características dimensionales. Los planos de piezas que incluyen soldaduras, a menudo proporcionan tamaños de soldadura y especificaciones dimensionales tales como la longitud y la ubicación. El tamaño de una soldadura a menudo se correlaciona directamente con la fuerza y el rendimiento asociado. Soldaduras con tamaño insuficiente podrían no resistir las tensiones aplicadas durante el servicio, y soldaduras de gran tamaño podrían producir concentraciones de tensión o contribuir al potencial de distorsión de un componente soldado (Anderson, 2007).

La inspección superficial y visual, sin embargo, no es suficiente. El dejar al descubierto discontinuidades de soldadura también es importante porque las imperfecciones dentro de o adyacentes a la soldadura, pueden evitar a la misma cumplir con la función para la cual fue diseñada. El número de discontinuidades de soldadura aceptables o inaceptables para una función determinada a menudo se obtiene a partir de los códigos y normas para soldar (Barbosa, Dille, Delplancke, Rebello, & Acselrad, 2006).

Además de la cantidad, la ubicación y distribución de las discontinuidades detectadas pueden ser cruciales y pueden resultar en un fallo prematuro de la soldadura mediante la reducción de los esfuerzos o la generación de concentraciones de tensiones en el elemento soldado (Wang, Shi, Lei, & Tian, 2005).

Los ensayos no destructivos que se llevaron a cabo corresponden a los de inspección de apariencia de la junta soldada y la zona afectada por el calor (HAZ). Las probetas que se inspeccionaron corresponden a las cortadas para la prueba de tensión como se muestran en la figura 25. Para esta inspección se usó una lupa de 10X como se muestra en la figura 30, con el fin de poder observar de una mejor manera las discontinuidades superficiales presentadas en la zona soldada.

El estándar utilizado como referencia para realizar la inspección visual de la soldadura fue el ASM Handbook volumen 17 (ASM, Visual Inspection, 1989).



Figura 31. Lupa 10x usada para la inspección visual.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION

3.1. Apariencia soldadura

El resultado de la evaluación de apariencia, mostró que ninguna probeta tuviera resultados negativos en cuanto a este aspecto; Esta observación se realizó por inspectores entrenados para detectar defectos sobre la superficie de la zona soldada, estos no detectaron defectos superficiales como se muestra en la tabla 5, a pesar de que se hicieron cambios en las otras variables que se tenían contempladas.

La evaluación de estas juntas soldadas se hizo sobre las probetas que se elaboraron para las pruebas de resistencia a la tensión como se muestra en la figura 31. Para hacer esta evaluación de una mejor manera y con esta zona aumentada, se utilizó una lupa de laboratorio de 10X con luz sobre la muestra que permite observar de manera detallada esta zona.

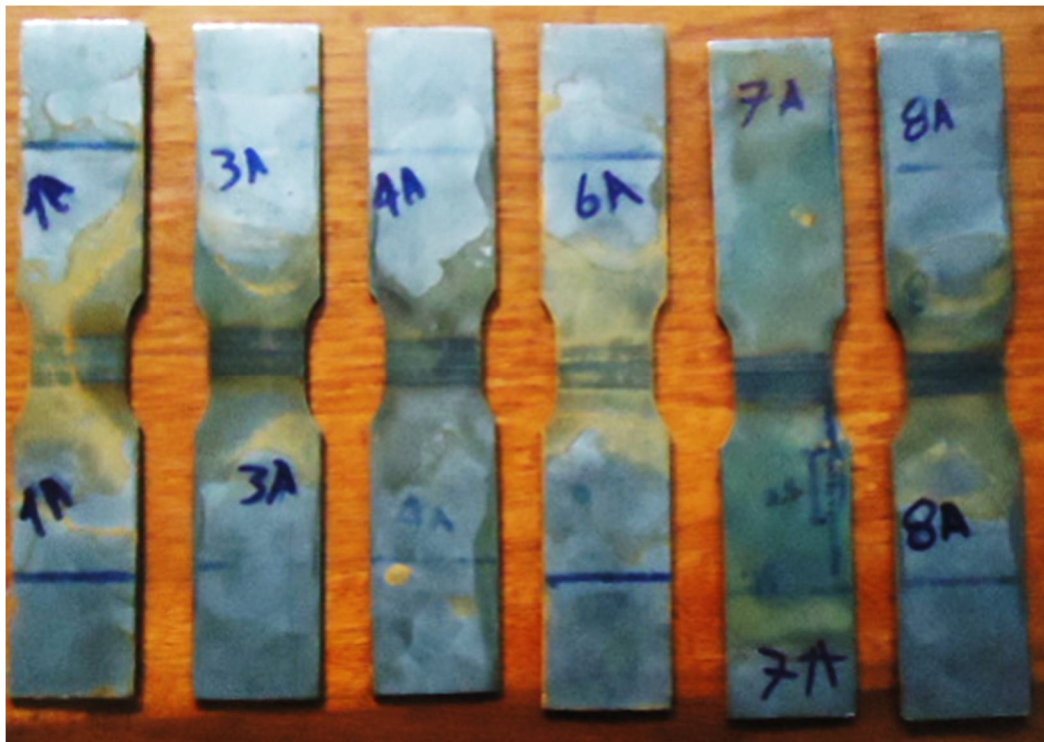


Figura 32. A la izquierda, selector de posición (tap selector) soldador Swift-Ohio 91AA del soldador usado en esta investigación, Fuente: Autor. Derecha, Principio eléctrico para un selector eléctrico tipo on-load tap changer, Fuente: <http://onloadtapchangersforp>

Tabla 5. Resultado de la evaluación visual de la superficie de la ZAC.

No. Tratamiento	Probeta No.	Resultado inspección visual defectos
1	A	Conforme
	B	Conforme
2	A	Conforme
	B	Conforme
3	A	Conforme
	B	Conforme
4	A	Conforme
	B	Conforme
5	A	Conforme
	B	Conforme
6	A	Conforme
	B	Conforme
7	A	Conforme
	B	Conforme
8	A	Conforme
	B	Conforme

3.1.1. Altura de recalcado (Upset)

Cuando se ejecutaron los tratamientos No.1, 2, 7 y 8 definidos en la tabla 4, la altura de la cresta fue baja, esto debido a que el parámetro de recalcado estaba en nivel bajo y que a su vez con la combinación del parámetro del voltaje alto de los tratamientos se generó aún una cresta menor debido a un calentamiento excesivo de la junta lo que llevó a que una mayor cantidad de material llegara hasta el punto de fusión y se ablandara exageradamente. Lo anterior, en conjunto con un tiempo de destello hizo que esta zona quedara con un aspecto de poca cresta por el exceso de calentamiento de la misma.

Lo anterior concuerda con los estándares AWS, donde se establece que cuando se presenta un exceso en la fuerza de recalcado, se observa una tendencia a expulsar mucho material que se encuentra en estado plástico, lo que genera una soldadura muy pobre; finalmente las líneas de flujo se observan paralelas a la soldadura.

Por otro lado, establece que cuando es insuficiente el recalcado, hay una deficiente expulsión de defectos en la soldadura, se presenta material fundido retenido, óxidos, inclusiones y vacíos en la soldadura (AWS, Chapter 27. Flash, Upset, and Percusion Welding., 1969).

3.1.2. Tiempo de destello (Flashing time)

Como se puede observar en los resultados de la tabla 5, en cuanto a la apariencia superficial de la soldadura se obtuvieron resultados conformes, lo que indica que esta característica es aceptada en todas las probetas. Sin embargo, durante el desarrollo de los diferentes tratamientos, se observó que la cresta

cambiaba tanto de tamaño en altura como de color de la misma, situación que afecta internamente el comportamiento de la zona soldada debido a que no todas las impurezas internas han sido retiradas durante este proceso.

En las probetas se observó que la cresta presentaba condiciones irregulares cuando el tiempo de destello estaba alto, es decir el material se sobrecalentaba lo que implicaba que una mayor cantidad de material llegara al estado de fusión y ocasionara una mala definición de la cresta.

Se puede decir que, el exceso de tiempo de destello ocasiona que el material esté muy blando para crear el recalcado adecuadamente; por el contrario cuando el tiempo de destello es insuficiente, no se genera suficiente plasticidad en la zona de la junta para generar el recalcado adecuado (AWS, Chapter 27. Flash, Upset, and Percussion Welding., 1969).

3.2. Microestructura

Los parámetros de soldadura que se usaron para el desarrollo de esta investigación se presentaron en la tabla 1. Estos parámetros fueron definidos de acuerdo con las necesidades de esta investigación y tomaron como base los parámetros definidos dentro del alcance de la misma. Para el estudio de la microestructura se realizaron análisis por microscopía óptica y microscopía de escaneo electrónico de barrido.

3.2.1. Microestructura del material base

La estructura del material SPFH590 está compuesta principalmente por una estructura ferrítica de grano fino laminar que es el resultado del proceso de fabricación del material el cual corresponde al proceso de rolado en caliente. En la figura 33, se observa una imagen de esta estructura ferrítica con diferentes aumentos tomadas con un microscopio óptico. Allí se muestra, en la columna de la derecha, la estructura de ferrita laminar en el material base.

La figura 34, presenta el material en su estado inicial evaluado por medio de microscopía electrónica de barrido, allí se observa una estructura de ferrita laminar situación que es natural debido a que el proceso de manufactura de esta lámina es rolado en caliente lo que implica que se generan granos alargados. Como se muestra en Roberts (Roberts, 1983), la estructura de los aceros HSLA es ferrítica-perlítica cuyas propiedades están determinadas por su estructura fina especialmente la ferrita y por algunas fases dispersas o dislocaciones en la ferrita.

Las figuras 35 y 36, muestran un material ferrítico similar al de este estudio, el cual consiste principalmente en una estructura ferrítica de grano fino, este muestra un contenido de 95% de ferrita con un tamaño de grano alrededor de 3,30 μm , lo que es natural para el material S460MC (QStE460TM) (Kerstens, 2009).

Las anteriores condiciones, se pueden aplicar a este estudio, pues se tiene que el material SPFH 590 es equivalente al material S420MC (QStE420TM) de acuerdo con la tabla Werkstoffdaten en donde su correspondencia es con el No. 1.0980 (Werkstoffdaten, 2006).

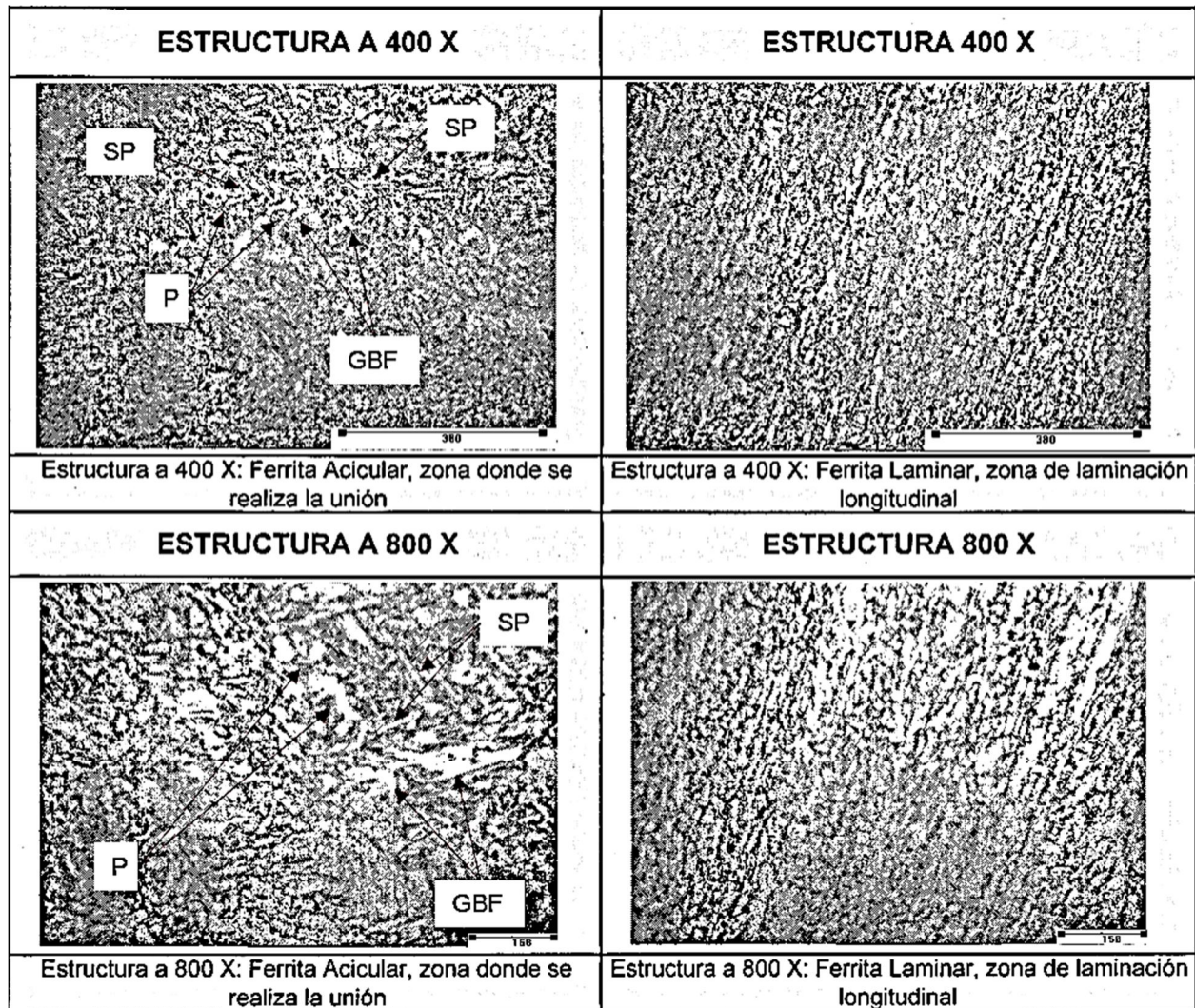


Figura 33. Material base SPFH 590. En la columna de la derecha, se observa ferrita laminar del material base (color claro) obtenida por el proceso de laminado en caliente 400X y 800X. En la columna de la izquierda ferrita acicular desordenada (color claro) de la junta soldada 400X y 800X. GBF: Grain Boundary ferrite. SP: Side-plate ferrite P: Pearlite

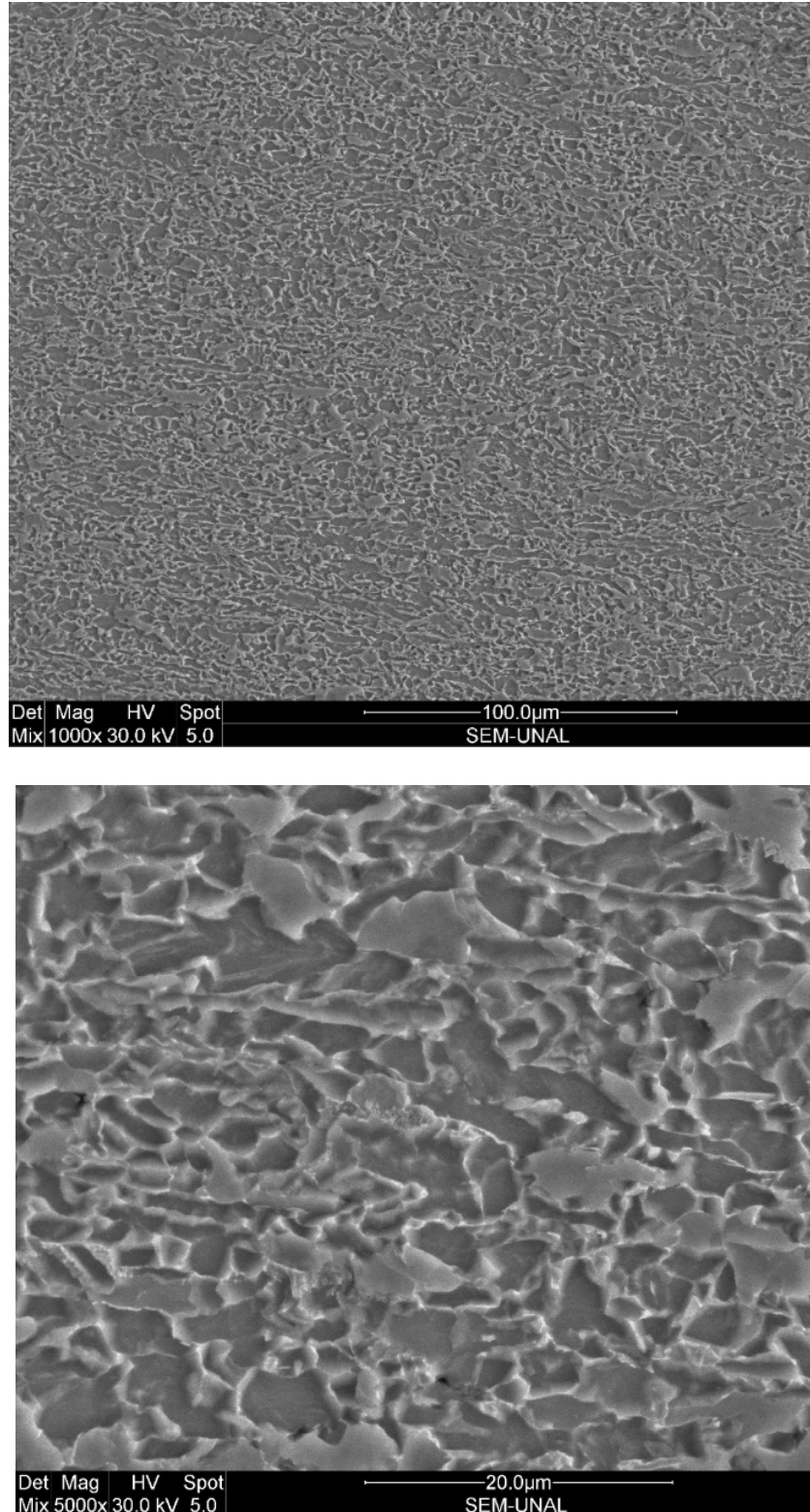


Figura 34. Imagen obtenida por SEM del material base SPFH 590 a diferentes aumentos. Parte superior 1000X. Parte inferior 5000X.

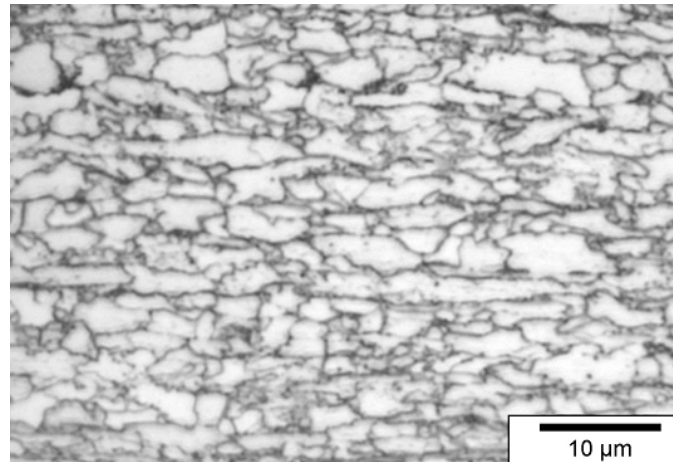


Figura 35. Material base estructura ferrítica S460MC. (Kerstens, 2009)

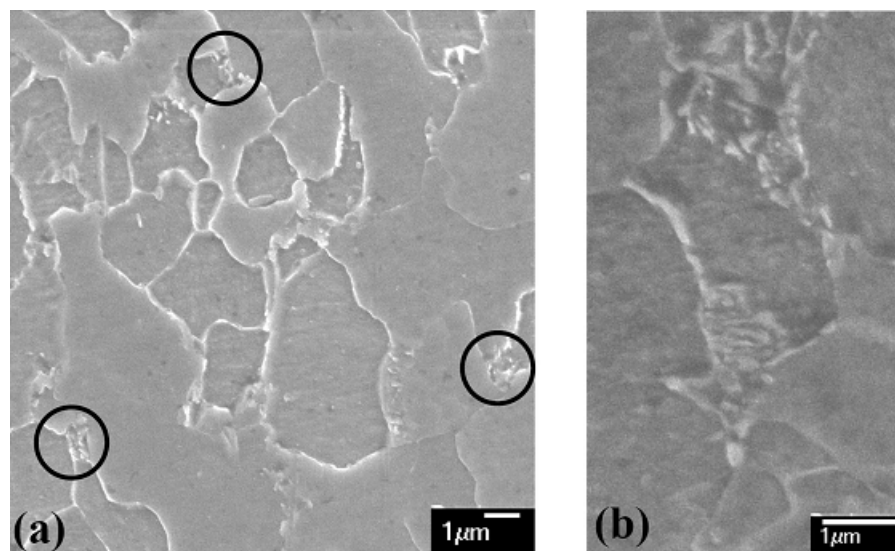


Figura 36. Imagen SEM (a) material base S460MC, los círculos indican bainita y (b) acercamiento a la bainita. (Kerstens, 2009)

3.2.2. Microestructura de la junta soldada

La microestructura de la junta soldadas corresponde a ferrita y perlita, específicamente ferrita acicular y perlita tal como se puede observar en la figura 33 en la columna de la izquierda, allí se observa de manera comparativa las micrográficas del material base y las de la junta soldada como resultado de esta investigación. Allí se ven las fases para el material base, que fueron explicadas en el numeral 3.1.1.

En la figura 37, se pueden ver imágenes de microscopía óptica de la sección transversal de la junta soldada. Se observa una línea vertical blanca, correspondiente a una capa descarburizada que se debe a

que el carbono del metal base se difunde en el área fundida durante el proceso de destello y se expulsa fuera en el proceso de recalcado. Kim et al., señala que esta descarburización es característica de este tipo de soldadura por resistencia, de igual forma se observan algunas discontinuidades que podrían indicar deficiencias en la soldadura como se observa en la figura 38 (Kim, So, & Kang, 2009).

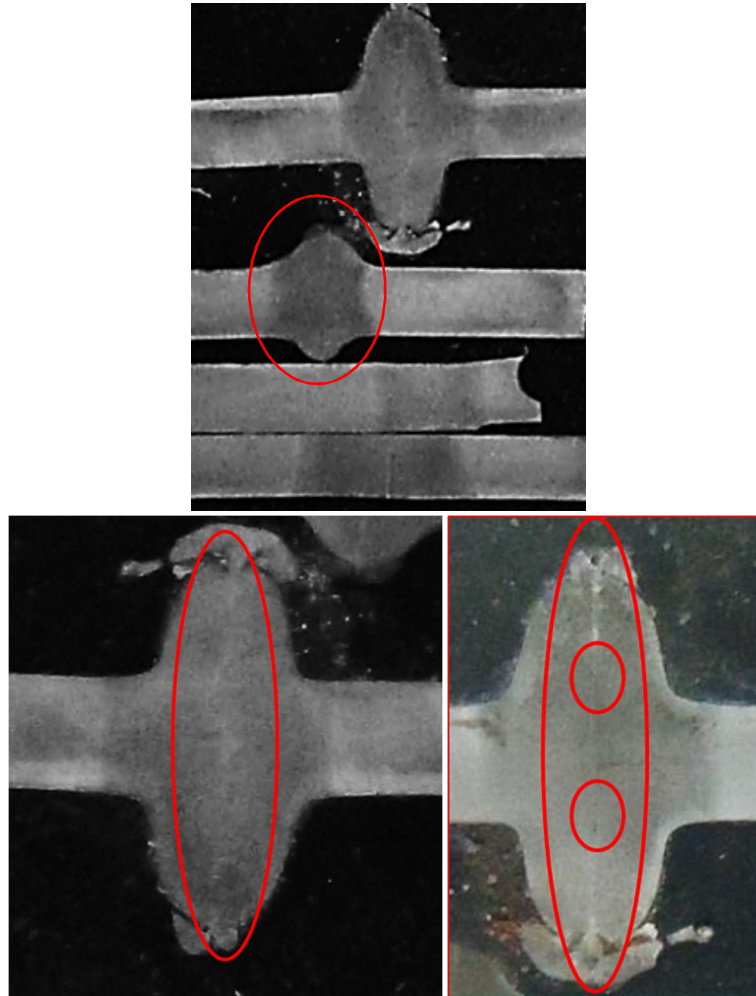


Figura 37. Probeta para análisis por microscopía óptica insertadas en bakelita. Corte transversal de la junta. Detalle en rojo zona afectada por el calor. El sentido de la laminación del material base SPFH 590 está en sentido horizontal. Imagen tomada a 10X.

En la figura 39, se observan las imágenes de las micrografías del escaneo electrónico de barrido (SEM) realizado que muestra comparativamente tanto a la zona de soldadura (zona afectada por el calor) como el material base, 39.a corresponde a la zona afectada por el calor, que muestra al igual que las micrografías ópticas la misma distribución de ferrita acicular, mientras que 39.b corresponde al material base. En la investigación de Ricks et al., se establece que la ferrita acicular es el resultado de una nucleación intragranular de ferrita Widmanstätten en aceros HSLA (Ricks, Howell, & Barritte, 1982),. Situación que se

equipara con este estudio, debido a que el material usado para este corresponde a uno con este mismo tipo de acero.

Analizando las imágenes de la figura 33, se observa que la ferrita (color claro) pasa de ser laminar (que se presenta en el material base) a una ferrita acicular (color claro) desordenada, ya que durante el proceso de soldadura, los granos alargados crecen y se vuelven más redondeados. Luego del enfriamiento, se forman unas estructuras de ferrita Widmanstatten identificada como SP (Side-plate) como se muestra en la figura 40 y que son resultados del estudio realizado por Ziemian, Sharma y Whaley (2012); al ser comparadas las figuras 33 y 42, se observan bastantes similitudes en cuanto a la forma de la estructura.

Esta estructura de ferrita acicular desordenada, estudiada también por Kumar et al., puede hacer que la resistencia a la tensión última sea igual o mayor que la del material base, sin embargo la aparición de ferrita Side-Plate o Widmanstatten podría generar soldaduras frágiles lo que incrementa el riesgo de aparición de fracturas prematuras (Kumar, Kumar, Datta, & Ranganath, 2010).

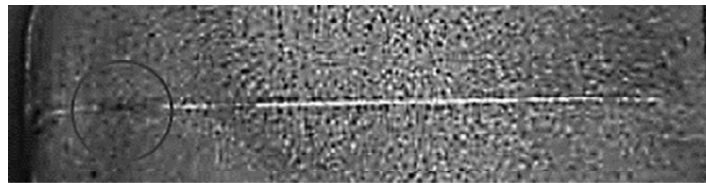


Figura 38. Macrosección de soldadura a tope por destello. Se observa línea blanca que indica zona descarburizada por el efecto de la soldadura. Igualmente encerrado en el círculo oscuro se observa una discontinuidad. (Kim, So, & Kang, 2009)

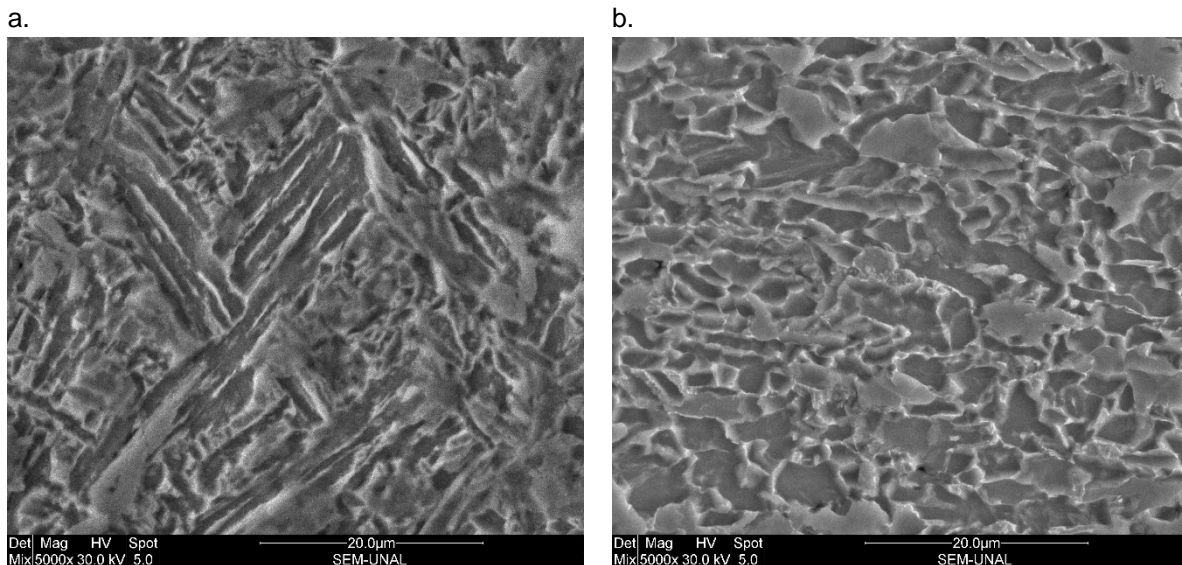


Figura 39. Micrografía SEM. a) Zona donde se realiza la unión, b) Material base.

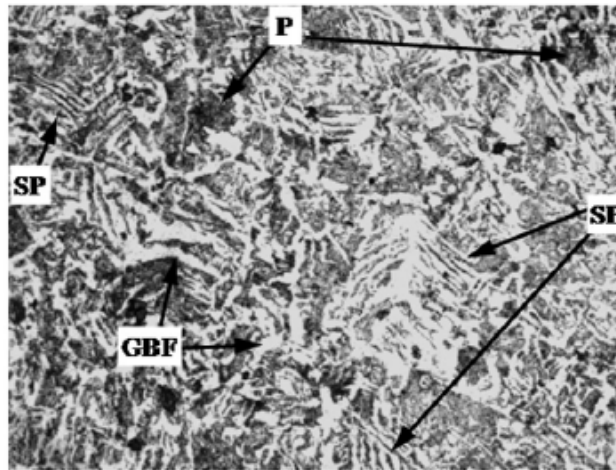


Figura 40. Imagen de microscopía óptica, microestructura acero ASTM A529. (Ziemian, Sharma, & Whaley, 2012)

3.2.3. Análisis Fractográfico

El análisis fractográfico se ilustra en la figura 41, estas imágenes corresponden a la probeta No.4B de este estudio, la cual presentó fractura fuera de la junta de la soldadura. Como se observa en la figura 41.c, se presenta principalmente un tipo de fractura llamada rotura por microhuecos (dimple rupture), de la misma manera que se observa en la imagen (a) de la misma tabla. Este tipo de fractura es causada por sobrecarga, y de acuerdo con ASM (ASM, Modes of Fracture, 1987), las aleaciones estructurales fallan por un proceso conocido como coalescencia de microgrietas. Estas microgrietas nuclean en regiones donde existen discontinuidades de deformaciones localizadas, las cuales están asociadas con partículas de segunda fase, inclusiones límites de grano y dislocaciones. A medida que la deformación en el material se incrementa, las microgrietas crecen y se juntan entre sí, y eventualmente forman una superficie de fractura continua (ASM, Modes of Fracture, 1987).

Este tipo de fracturas, también se llaman fracturas dúctiles, caracterizadas por el mismo tipo de pequeños agujeros que debido a la carga a la que se somete la pieza, estos nuclean. De manera similar, cuando las inclusiones donde se nuclean los pequeños agujeros, son largas y planas como sucede en los aceros rolados, la ductilidad medida de manera perpendicular al plano de rolado puede ser baja, lo que ocasiona un desgarro de tipo laminar, como se observa en la figura 41.c (Möser, 2015). Este mismo efecto se observa en la figura 41.e, donde se ve que hay desgarro laminar en la superficie de la falla.

En el caso de la muestra No. 8A, cuyas imágenes se observan en la figura 42.c, corresponden a una fractura que se generó justo sobre la junta donde se realizó la soldadura. Este tipo de falla es característico de fracturas del tipo separación (cleavage) (ASM, Modes of Fracture, 1987). Este tipo de fractura se cataloga dentro del tipo de fractura frágil que se propaga a través de los granos (transgranular) como se ve en la figura 44.a y 44.b. Por otro lado, si la propagación se hace alrededor de los límites de grano (intragranular) se observa como se muestra en la figura 44.e y 44.f, esta misma situación se observa en la figura 44.g y 44.h.

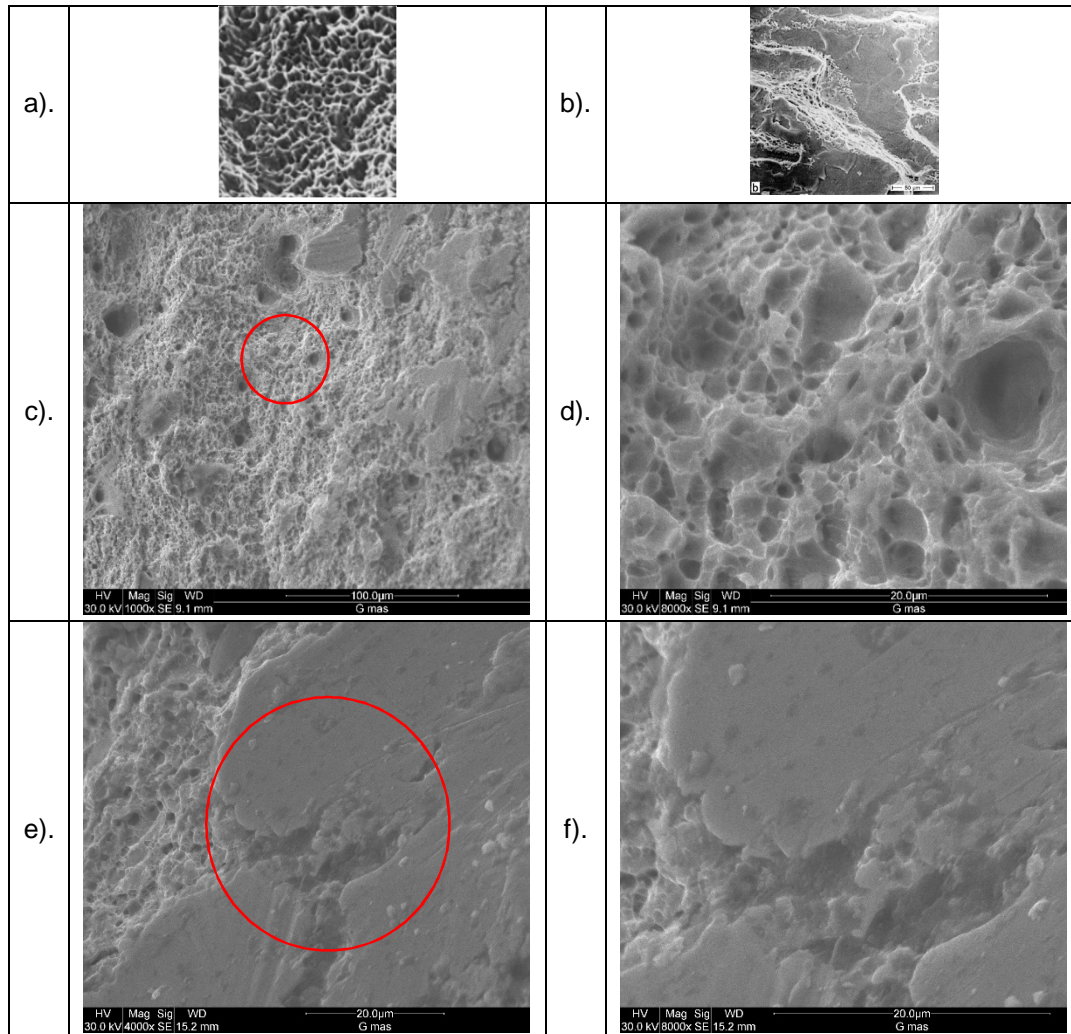
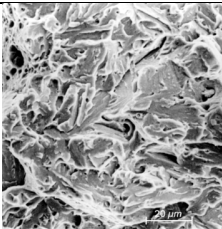
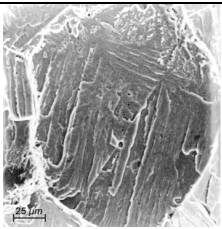
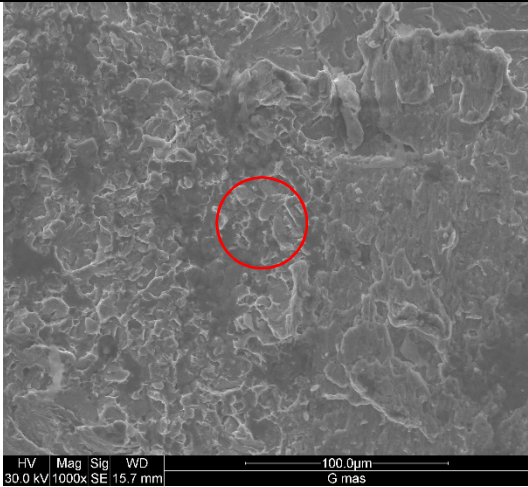
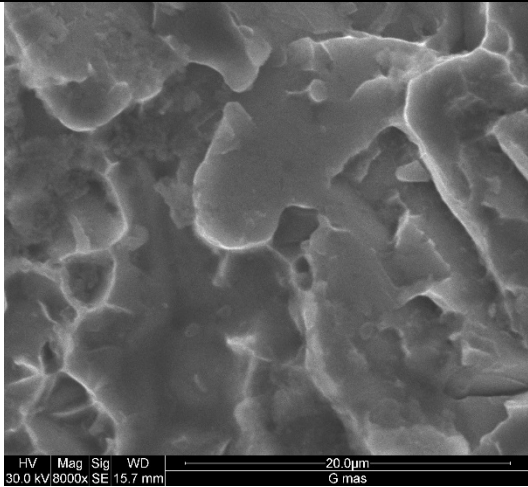
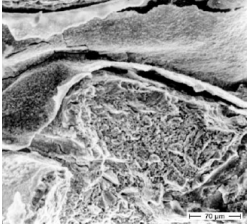
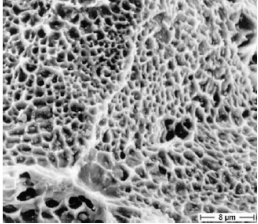
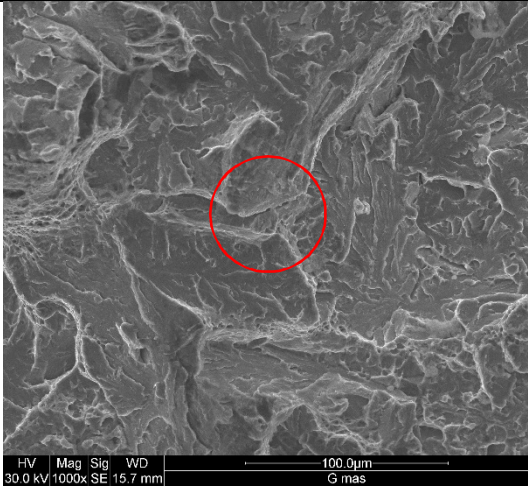
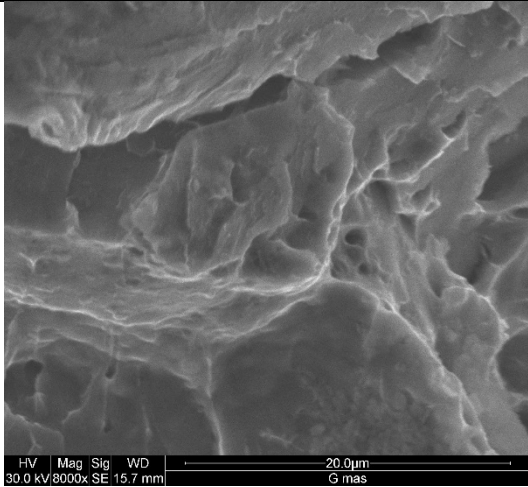


Figura 41. Diferentes tipos de fractografías. (a) imagen acero para resortes con coalescencia de microgrietas cónicas (Fuente: ASM, 1987). (b) imagen desgarro laminar en acero de bajo carbono (Fuente: M. Möser, 2007). (c) imagen zona central junta probeta No. 4B fracturada con falla por microgrietas cónicas. (d) magnificación de lo visto en (c). (e) imagen zona central junta probeta No. 4A fracturada con falla desgarro laminar. (f) magnificación de lo visto en (e).

Para el caso de los aceros estructurales de alta resistencia (con resistencia alrededor de 500 a 600 MPa), el problema principal de la soldadura realizada en este tipo de acero son las llamadas roturas que se ocasionan bajo los granos (underbead cracks) causadas por el hidrógeno que se deposita bajo la soldadura o dentro de la misma. Este hidrógeno difundido, desde la soldadura dentro de la zona afectada por el calor del material base se acumula como inclusión. A su vez, este se presuriza como gas generando una alta carga interna relativa perpendicular a la cara plana de la inclusión. Este tipo de fallas se cataloga dentro de las fracturas inducidas por un medio, que para este caso es agrietamiento por hidrógeno (hydrogen cracking) (Möser, 2015). Imágenes de este efecto se pueden ver en la figura 42.i y 42.j.

a).		b).	
c).		d).	
e).		f).	
g).		h).	

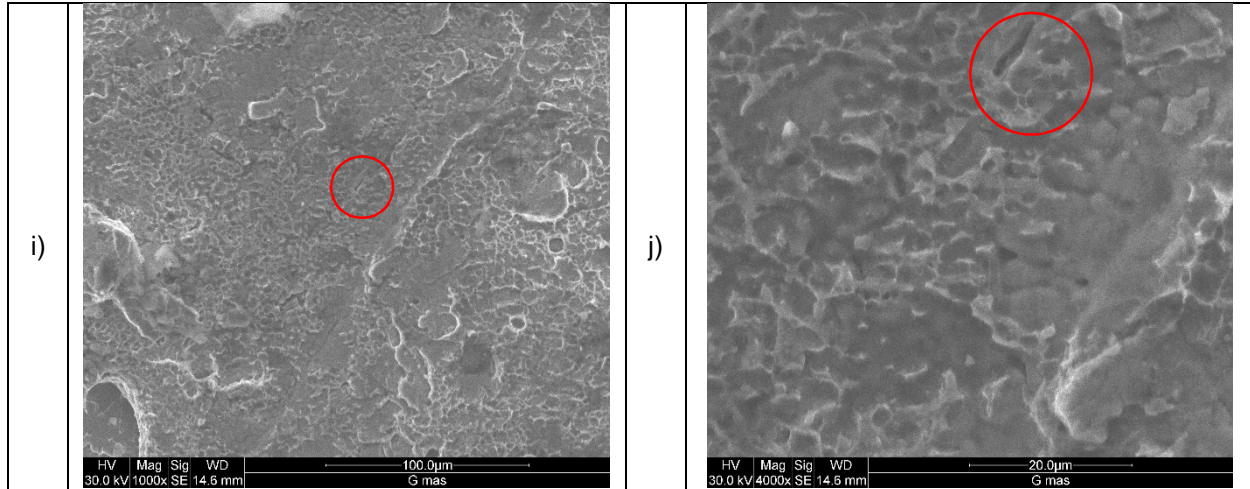


Figura 42. Diferentes tipos de fractografías. (a) imagen acero de bajo carbono endurecido; separación fina. (Fuente: M. Möser, 2007). **(b)** imagen acero Cr-Ni dos fases con agrietamiento aislado de grano sencillo sin patrón de río (Fuente: M. Möser, 2007). **(c)** imagen zona central junta probeta No. 8A fractura frágil del tipo separación. **(d)** magnificación de lo visto en (c). **(e)** imagen de oxidación interna: conchas límite de grano desprendidas (Fuente: M. Möser, 2007). **(f)** agrietamiento en relajación: límites de grano cubiertos con finos hoyuelos (Fuente: M. Möser, 2007). **(g)** imagen zona central junta probeta No. 8A fracturada con falla desgarró laminar. **(h)** magnificación de lo visto en (g). **(i)** imagen agrietamiento por hidrógeno en probeta No. 8B. **(j)** magnificación de lo visto en (i).

3.3. Pruebas mecánicas

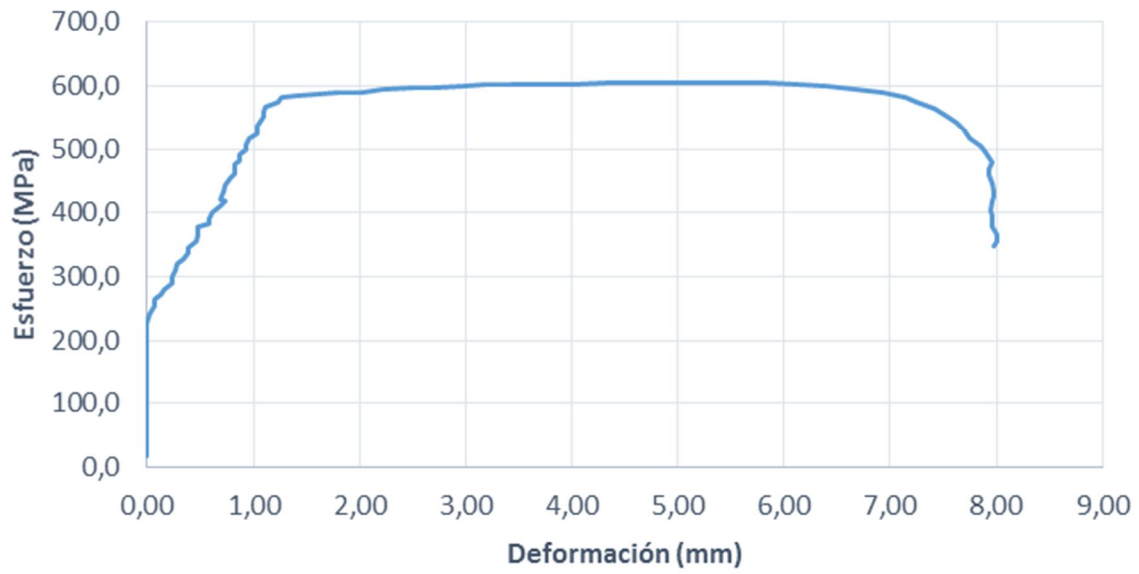
A continuación se observarán los resultados de los ensayos mecánicos realizados sobre las probetas.

3.3.1. Resistencia a la tracción

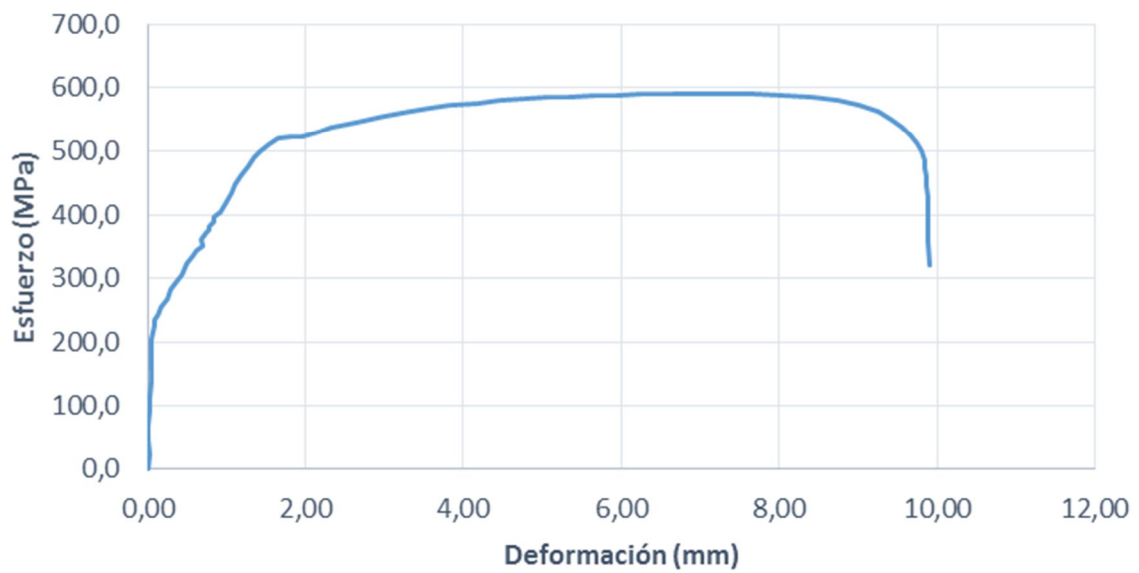
Uno de los métodos empleados para observar la resistencia de la soldadura es la prueba de tracción. Las probetas se obtuvieron como se explicó en el capítulo anterior.

En la figura 43, se observan las curvas resultado de las pruebas de resistencia a la tensión que se ejecutaron sobre las probetas fabricadas de acuerdo con los tratamientos expuestos en el capítulo 2. Los resultados relevantes de estas pruebas se ven en la tabla 6. Igualmente, en la figura 46, se puede observar gráficamente estos resultados para una mayor comprensión de los mismos.

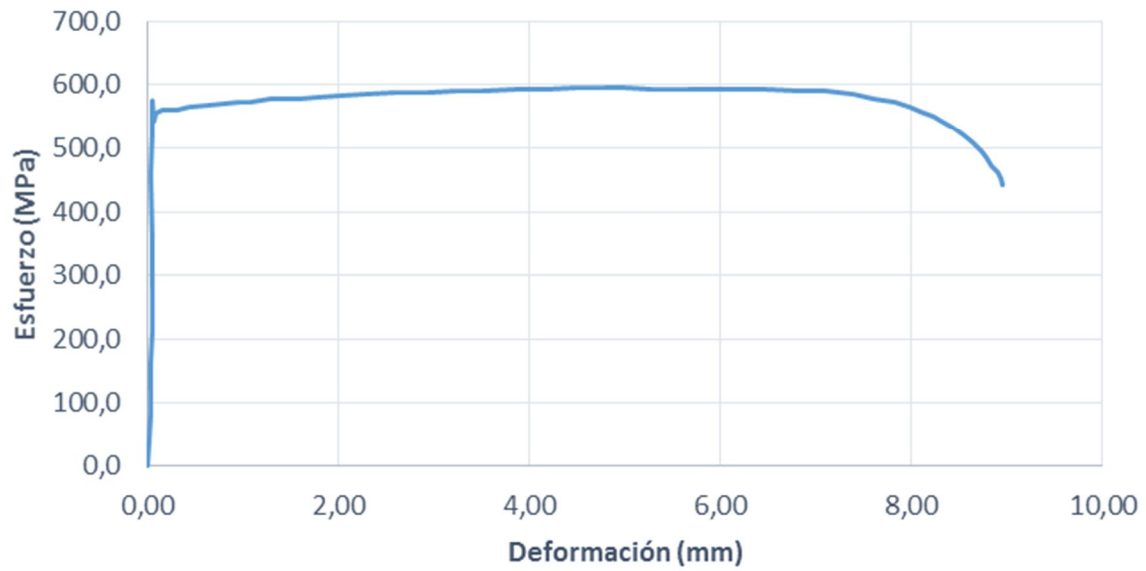
Probeta 1A



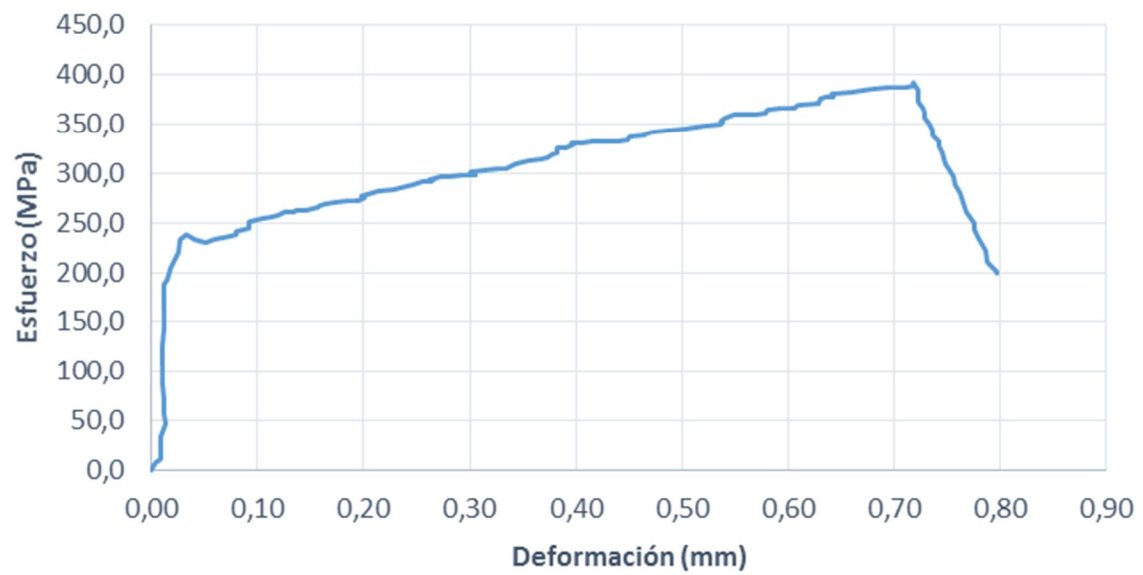
Probeta 1B



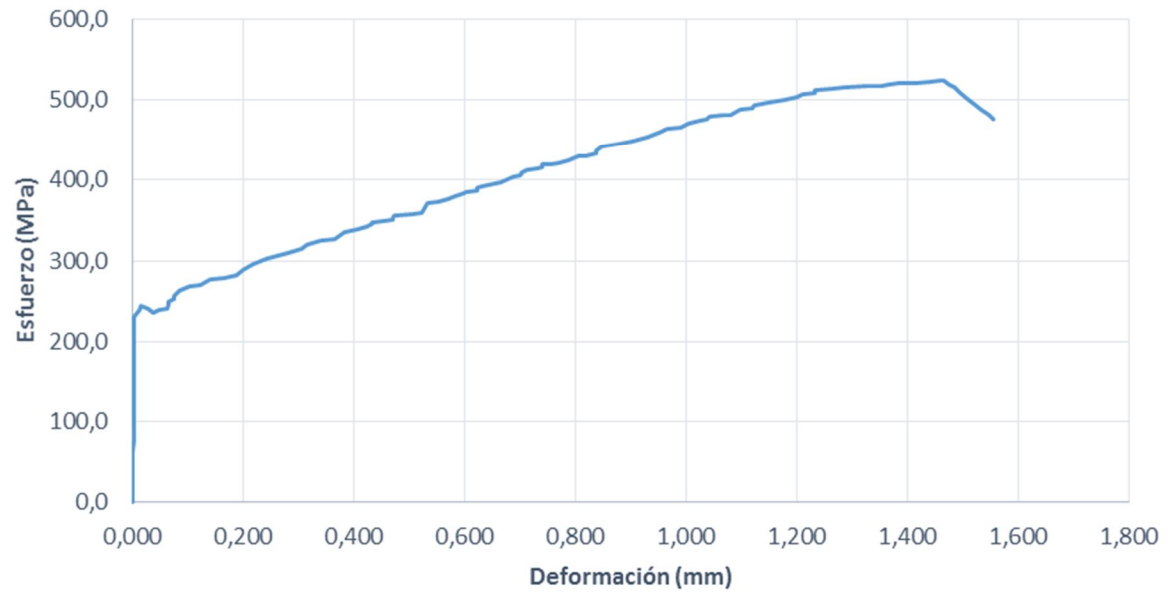
Probeta 2A



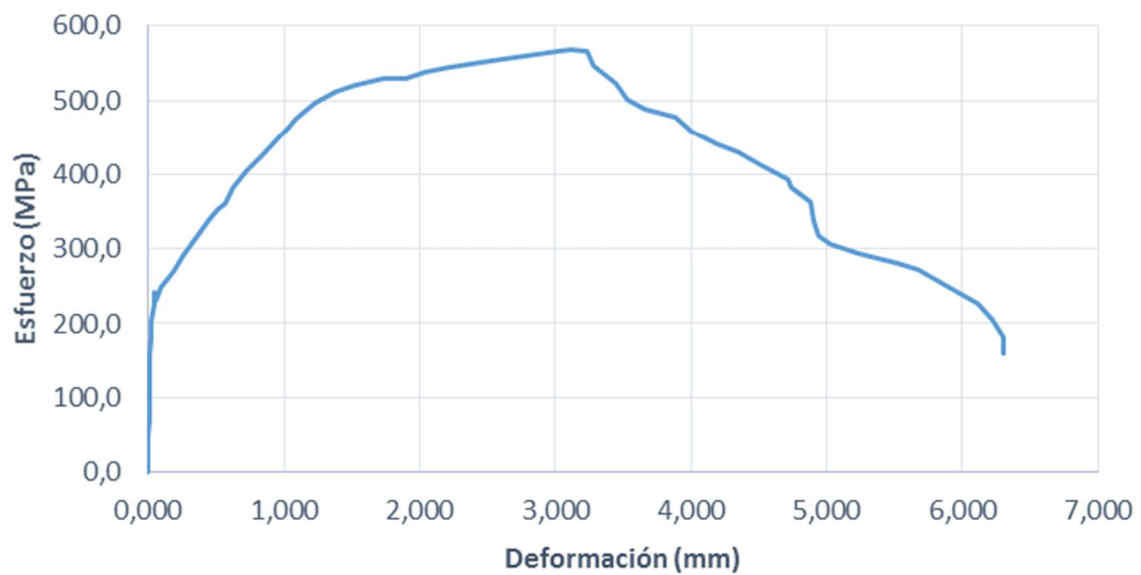
Probeta 2B



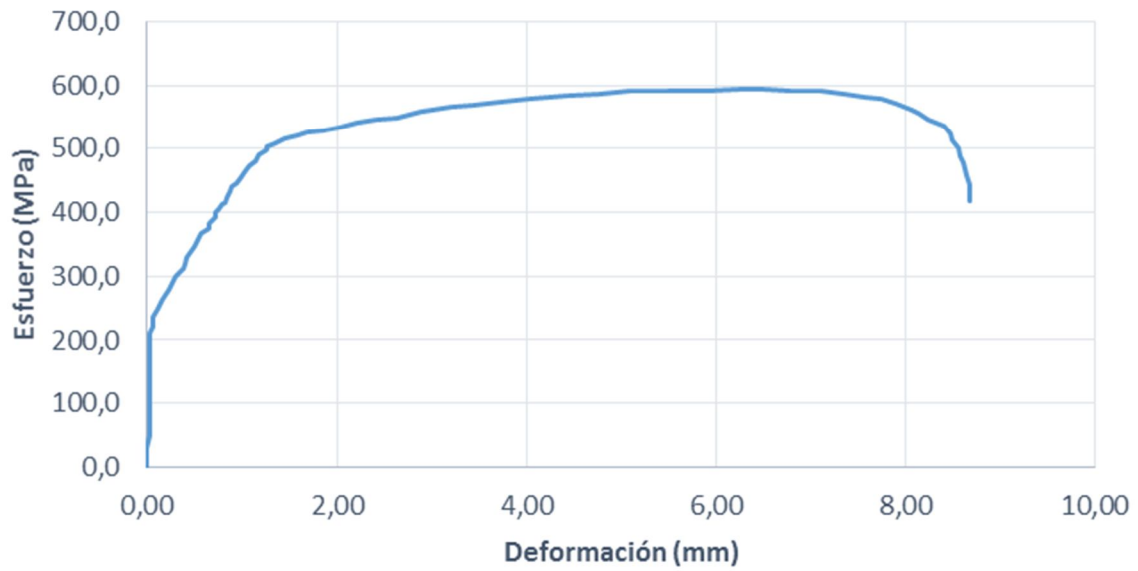
Probeta 3A



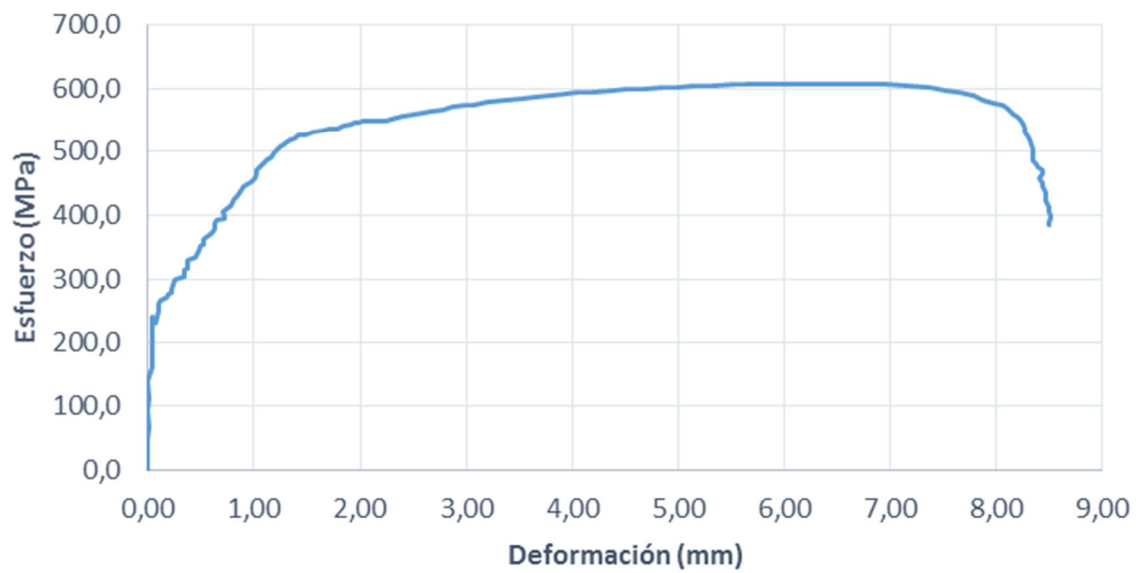
Probeta 3B



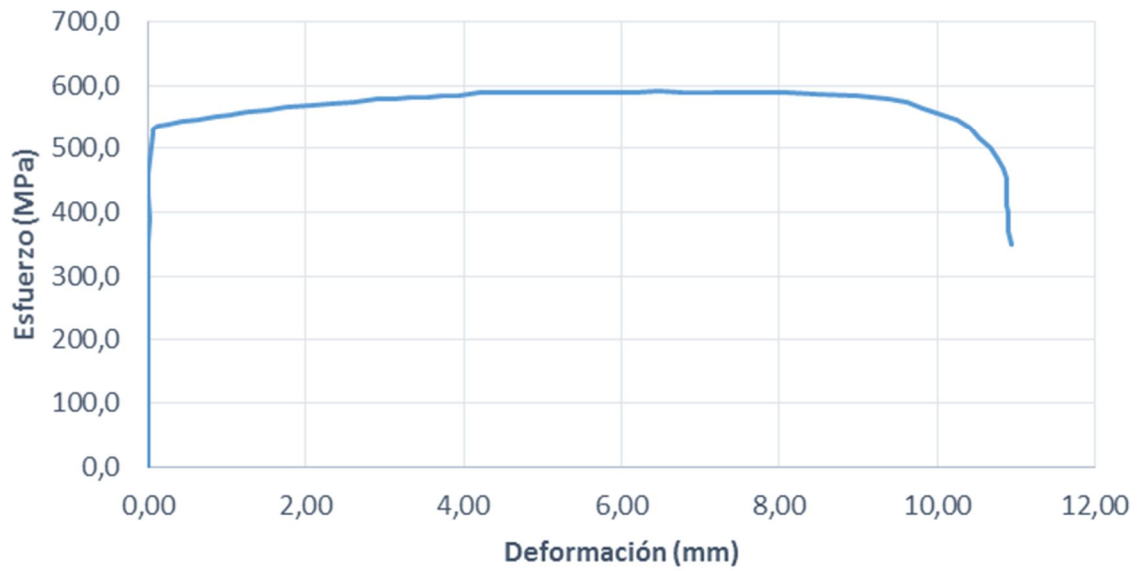
Probeta 4A



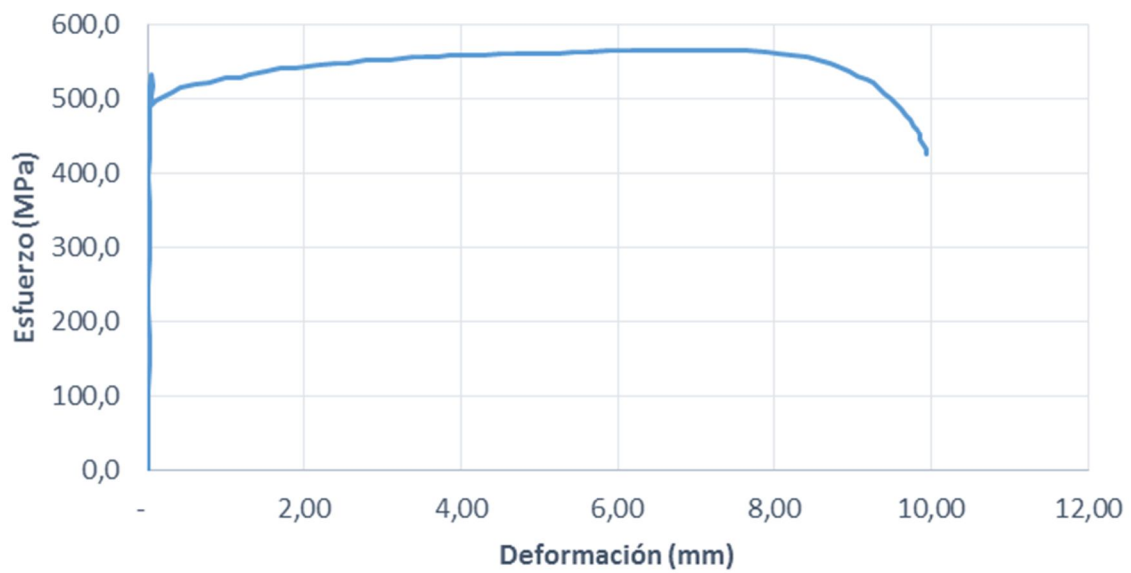
Probeta 4B



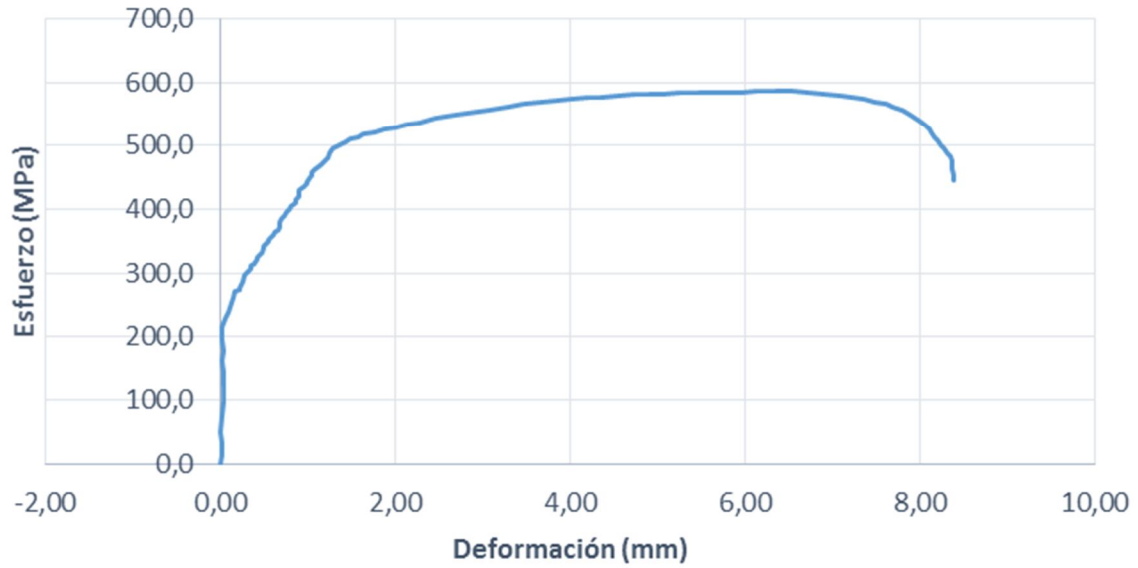
Probeta 5A



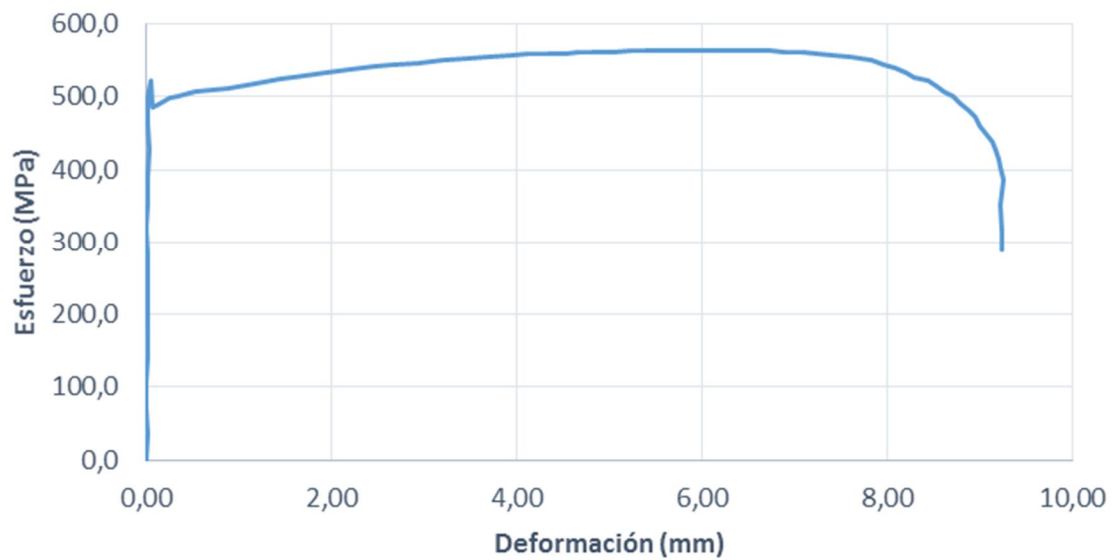
Probeta 5B



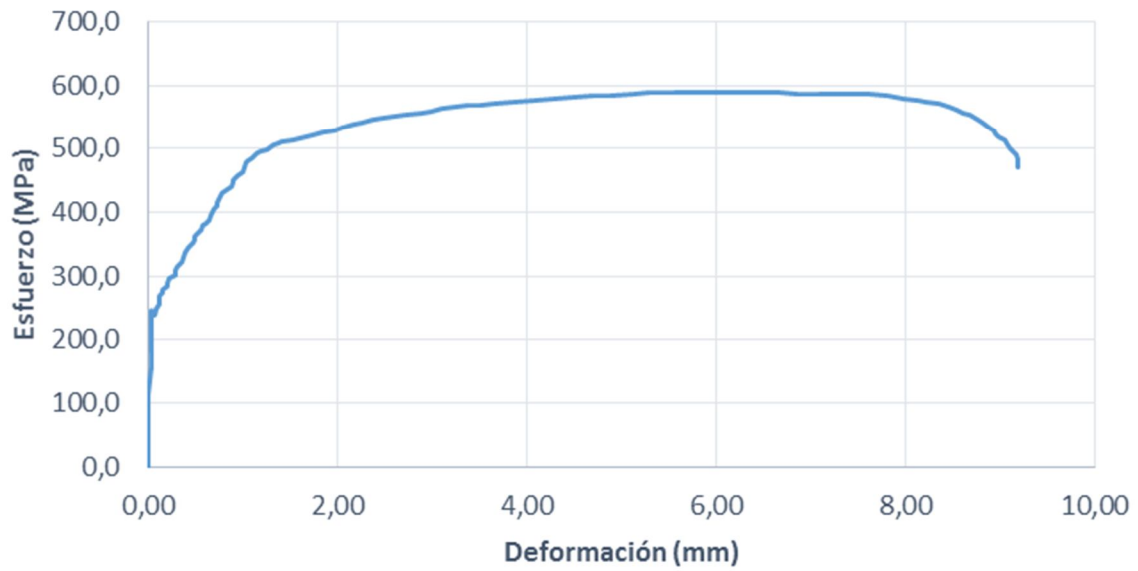
Probeta 6A



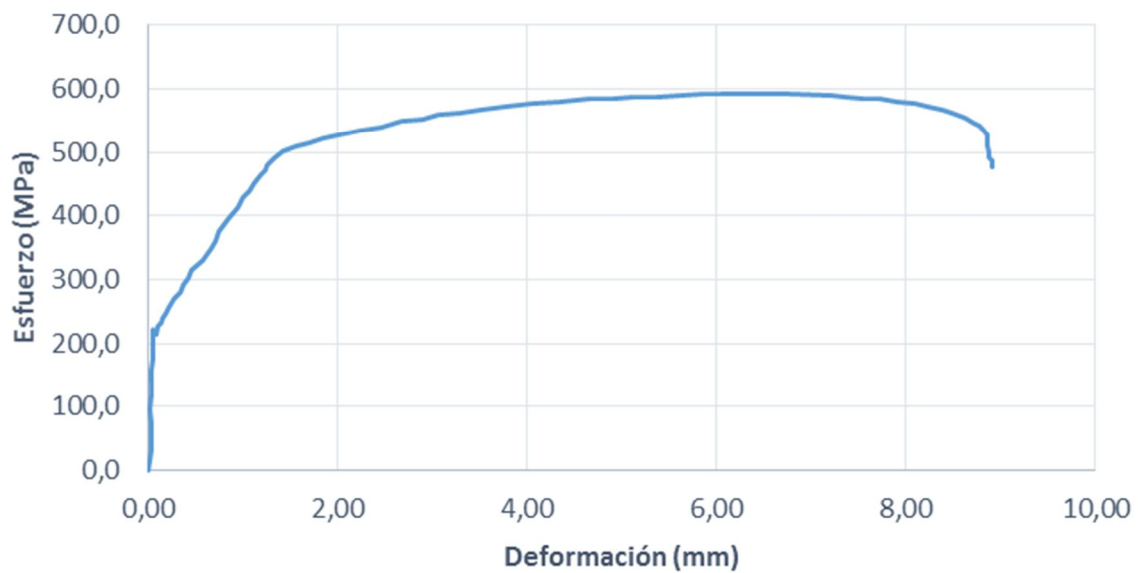
Probeta 6B



Probeta 7A



Probeta 7B



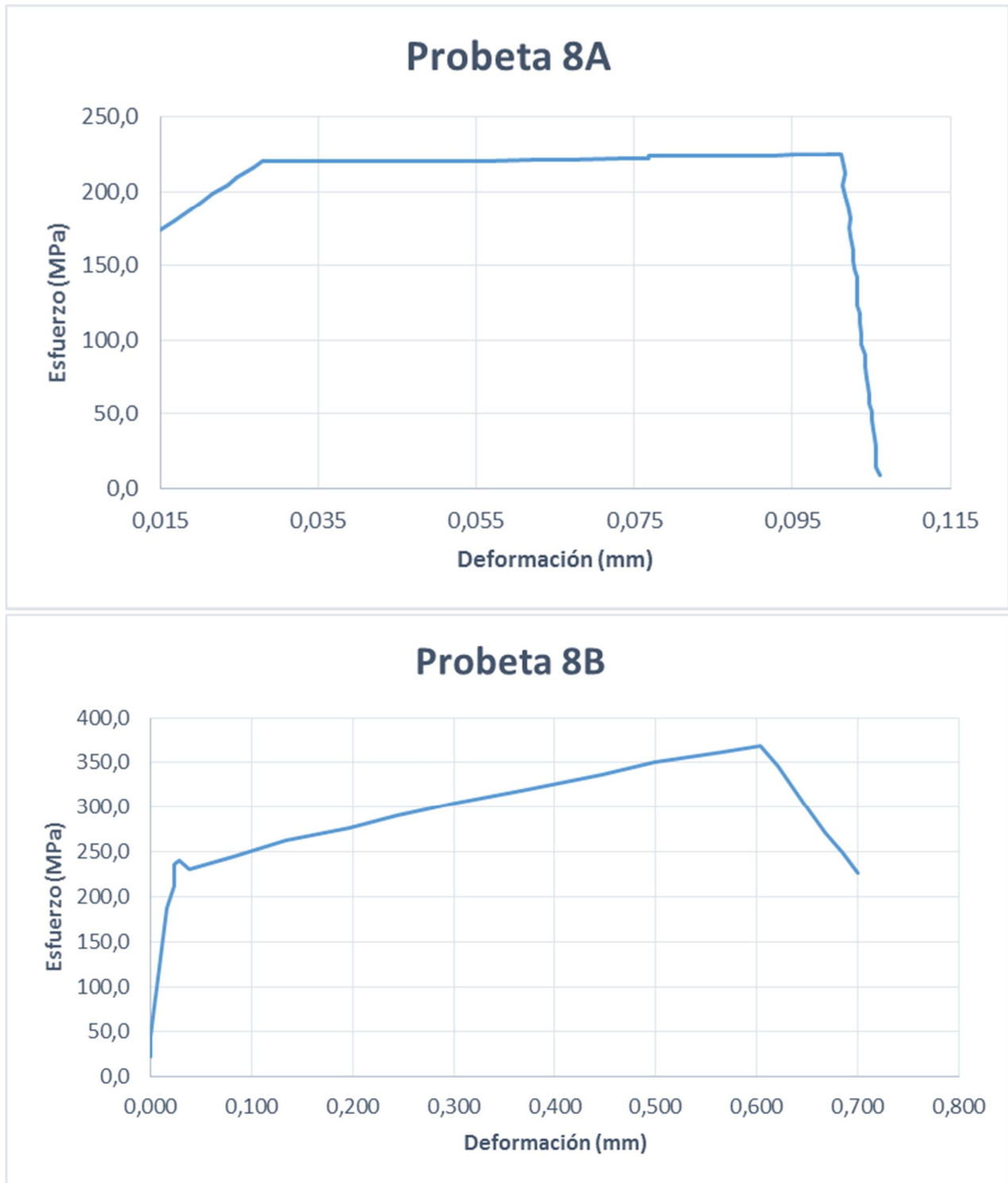


Figura 43. Curvas de resultado de prueba de resistencia a la tensión sobre probetas

En la figura 43, se observa un comportamiento no esperado de la curva de esfuerzo-deformación para la probeta 8A. Al analizar la imagen de esta probeta en la figura 45, se observa que la rotura presentada está en la junta de la soldadura, esto se corrobora cuando se observan los resultados de resistencia a la tracción en la tabla 6 donde se ven los resultados más bajos de todo el set de pruebas. Sin embargo es necesario mencionar que este comportamiento de la curva de la figura 43 para la probeta 8A, presentó deslizamiento de mordazas que influyó en la forma de la misma; al observar con detenimiento la probeta, existe una evidencia de una mala sujeción durante la realización del ensayo. De la misma manera se puede analizar la probeta 8B, pues presenta un comportamiento similar tanto en la curva de esfuerzo-deformación como en el resultado de la prueba de tracción al observar la imagen de la probeta en la figura 45.

La tabla 6, muestra que se presentó rotura en la junta de la soldadura de probetas en los tratamientos No. 3 y 8, lo que indica que estas soldaduras no son adecuadas puesto que la falla debe presentarse fuera del lugar donde se realizó la junta soldada. De manera similar, en el estudio de Centinkaya et al. (Centinkaya & Arabaci, 2006), al haber una falla en la ZAC, se determina que esta zona presenta una menor resistencia debido al efecto térmico.

La resistencia a la tracción, decrece en función de la potencia usada para la soldadura, lo que sucede es que este incremento de potencia genera un crecimiento de los granos de la zona afectada por el calor ZAC lo que finalmente ocasiona una pérdida de resistencia en la junta soldada como lo observó Sharifitabar et al. (Sharifitabara, Halvae, & Khorshahian, 2011), en su estudio. Por otro lado, un mayor calor de entrada incrementa los residuos líquidos en la cara de la junta y produce una considerable cantidad de fase de austenita Widmanstätten. La forma de platos de esta fase incrementa la concentración de esfuerzos en esta región y por lo tanto disminuye la resistencia de la junta.

Tabla 6. Resultados pruebas de tracción.

No. Tratam.	Probeta No.	TS (MPa)	% Elong.	Observaciones
1	A	604,2	30,1	Falla lámina
	B	589,5	29,9	Falla lámina
2	A	595,0	17,9	Falla lámina
	B	392,0	2,5	Falla junta
3	A	523,7	3,5	Falla junta
	B	568,3	17,8	Falla junta
4	A	593,7	21,2	Falla lámina
	B	606,0	27,9	Falla lámina
5	A	590,5	20,7	Falla lámina
	B	566,2	19,2	Falla lámina
6	A	586,8	26,1	Falla lámina
	B	563,4	17,9	Falla lámina
7	A	589,1	29,6	Falla lámina
	B	591,7	25,9	Falla lámina
8	A	224,8	2,2	Falla junta
	B	369,6	2,1	Falla junta

La tabla 6 muestra que las probetas del tratamiento No. 8, reportan valores muy inferiores al valor nominal de resistencia y de valores de elongación del material base. Los valores esperados como resultado del proceso de soldadura y que permitirían continuar con el proceso de transformación del material en los pasos para fabricar un aro, corresponderían a las probetas No. 1 y No. 7, donde se observan valores altos de resistencia a la tracción y valores de elongación aceptables que estarían por encima del valor nominal de resistencia a la tensión del acero SPFH 590 que corresponde a 590 MPa.

La figura 44 muestra las probetas ya ensayadas, estas son las que presentaron resultados de resistencia a la tracción más altos del grupo ensayado. Los resultados de las pruebas, se pueden ver en la tabla 6, de donde podemos determinar que las condiciones de operación definidas como voltaje nivel bajo (VNB), altura de recalcado nivel bajo (AFNB) y tiempo de destello nivel bajo (TDNB) adoptadas para las probetas No. 1 obtuvieron los mejores resultados de resistencia a la tracción.

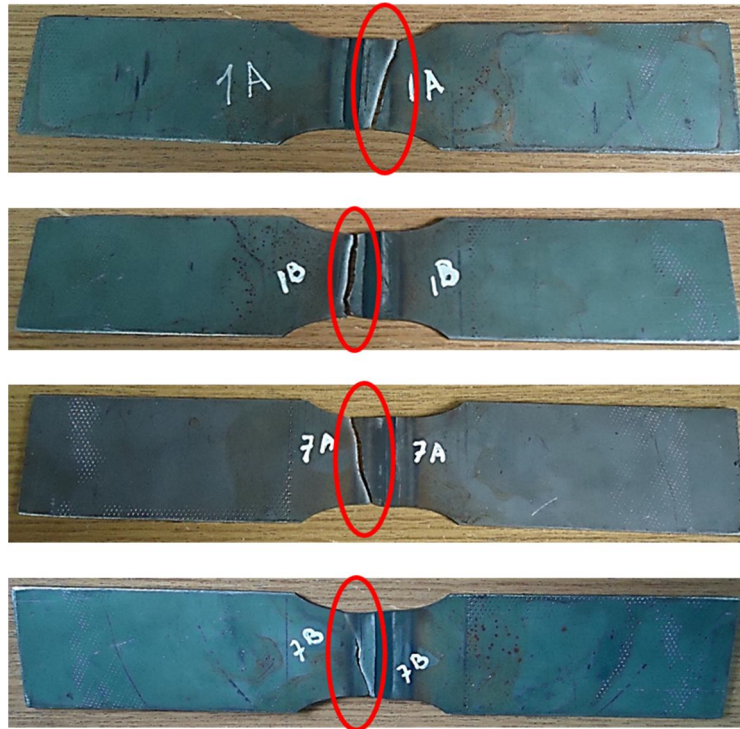


Figura 44. Probetas pruebas tracción 1A, 1B, 7A y 7B, que presentaron rotura fuera de la junta de soldadura.

Así mismo, la figura 45, muestra algunas probetas ya ensayadas correspondientes a las que presentaron resultados de resistencia a la tracción más bajos del grupo ensayado. Los resultados de las pruebas, se pueden ver en la tabla 6.

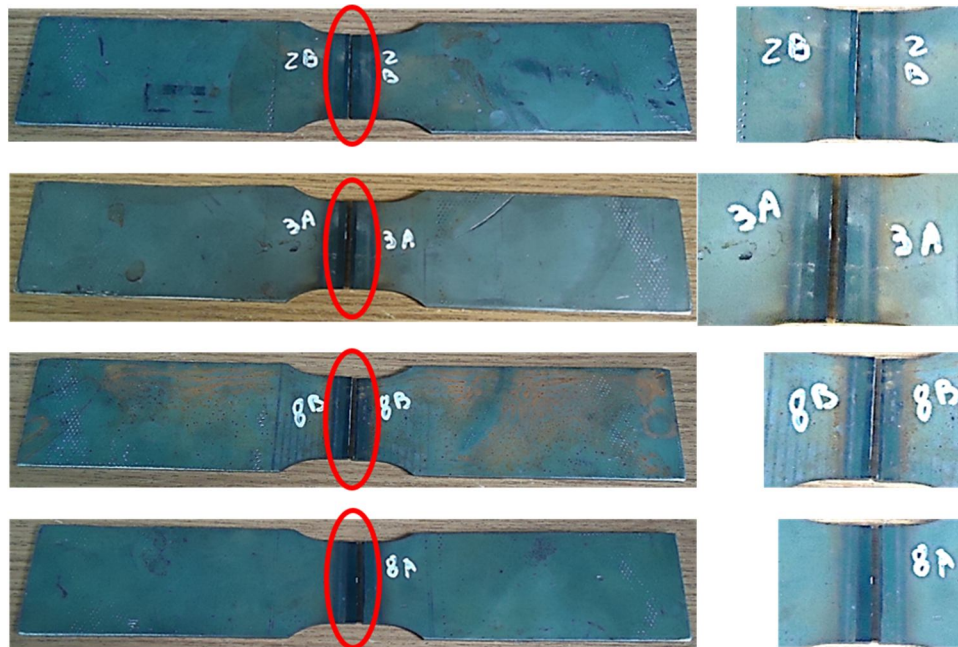


Figura 45. Probetas prueba tracción 2B, 3A, 8A y 8B, que presentaron rotura en la junta soldada. A la derecha se ve el detalle aumentado de la junta.

La figura 46 muestra gráficamente el comportamiento de resistencia a la tracción (TS) y el porcentaje de elongación (% Elong.). Con esta imagen podemos confirmar que las probetas que presentaron rotura en la zona de la soldadura son las que tienen un valor de resistencia a la tracción muy por debajo de 590 MPa, dentro de estas podemos encontrar las probetas 2B, 3A, 3B, 8A y 8B.

Con respecto a porcentaje de elongación, de acuerdo con la información del material base, este valor debe ser mínimo 22%; al revisar la información de la figura 46, se observa que las probetas que superan este valor son la 1A, 1B, 4B, 6A, 7A y 7B. De acuerdo con lo anterior, las probetas No 1 y No. 7 son las que cumplirían en el 100% de los casos por lo tanto las combinaciones utilizadas para realizar estas soldaduras son las que presentan un buen comportamiento. Los tratamientos No. 1 y 4 en promedio presentaron valores mayores de resistencia a la tracción, la única diferencia entre estos tratamientos es el cambio de altura de forja, lo que nos puede decir que con el cambio de forja usando estos valores de voltaje y tiempo de destello el comportamiento mecánico es similar. Por otra parte, la probeta 2A cumplió la resistencia a la tracción, mientras que la 2B no cumplió, esto se puede atribuir a deficiencias en la estructura del material durante el proceso de soldadura.

En lo que respecta a las probetas No. 2B, 3A, 8A y 8B, se observa que los valores de porcentaje de elongación son inferiores al 5%, estas mismas probetas presentaron rotura en la zona de la soldadura como se ve en la figura 45, lo que permite decir que presentan un comportamiento frágil, ocasionado por el mismo efecto que genera que la resistencia a la tracción sea menor en estas mismas probetas, como se explicó anteriormente.

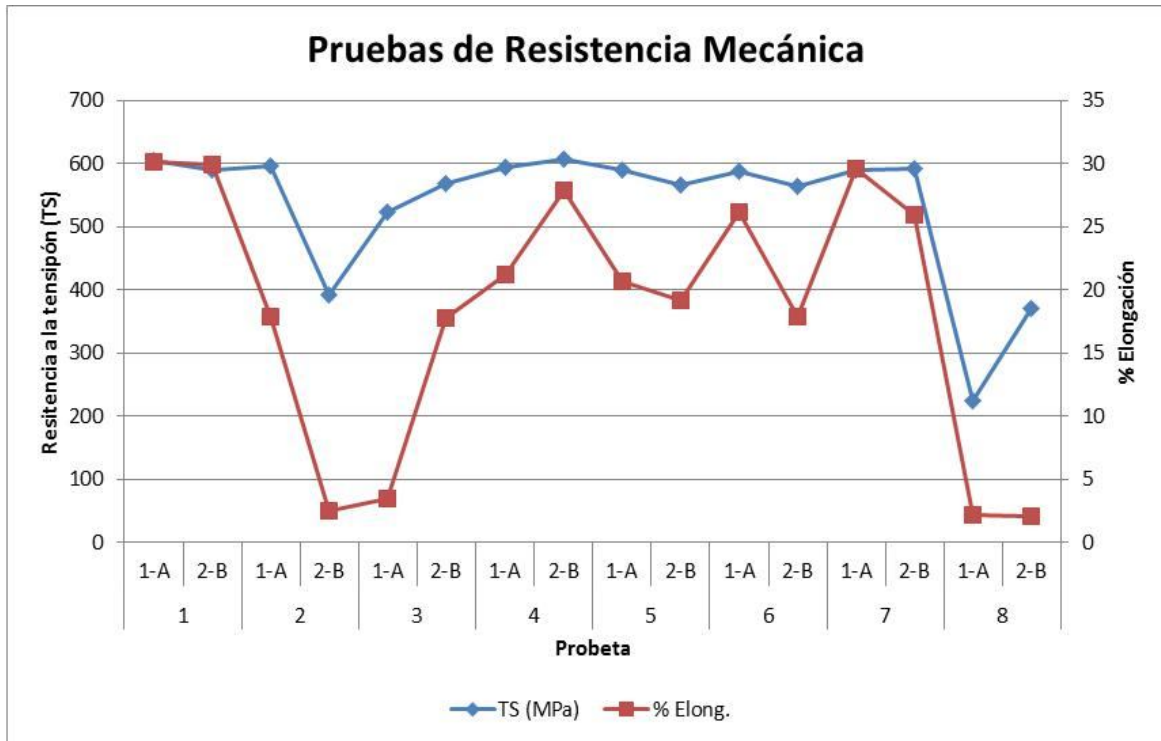


Figura 46. Gráfico resumen de resultados de pruebas mecánicas.

3.3.2. Microdureza

El otro método empleado para evaluar la soldadura, específicamente la zona afectada por el calor (ZAC) son los análisis de microdureza. Para este estudio, se optó por la microdureza Knoop, la cual arrojó los resultados que se muestran en la tabla 7.

Probeta A y B corresponde a las dos réplicas de cada uno de los tratamientos establecidos desde T1 hasta T8. Los valores i1 a i7 y d1 a d7 corresponden a los puntos que se tomaron tanto a izquierda (i) como a derecha (d) del lugar donde se observó el centro de la soldadura denominado como “cero” en la tabla; cada uno de estos puntos están distanciados 0,5 mm por lo que se recorrió en total una distancia de 7,0 mm en cada una de las probetas, 3,5 mm a la derecha y 3,5 mm a la izquierda del centro. Estos mismos resultados se observan gráficamente en la figura 47 para cada uno de los tratamientos por separado y en la figura 48, se observa el promedio de los valores de las dos probetas para cada uno de los tratamientos.

En estas figuras se observa un comportamiento donde la mayor dureza se encuentra hacia el centro de las probetas, es decir en la zona donde se ha realizado la soldadura.

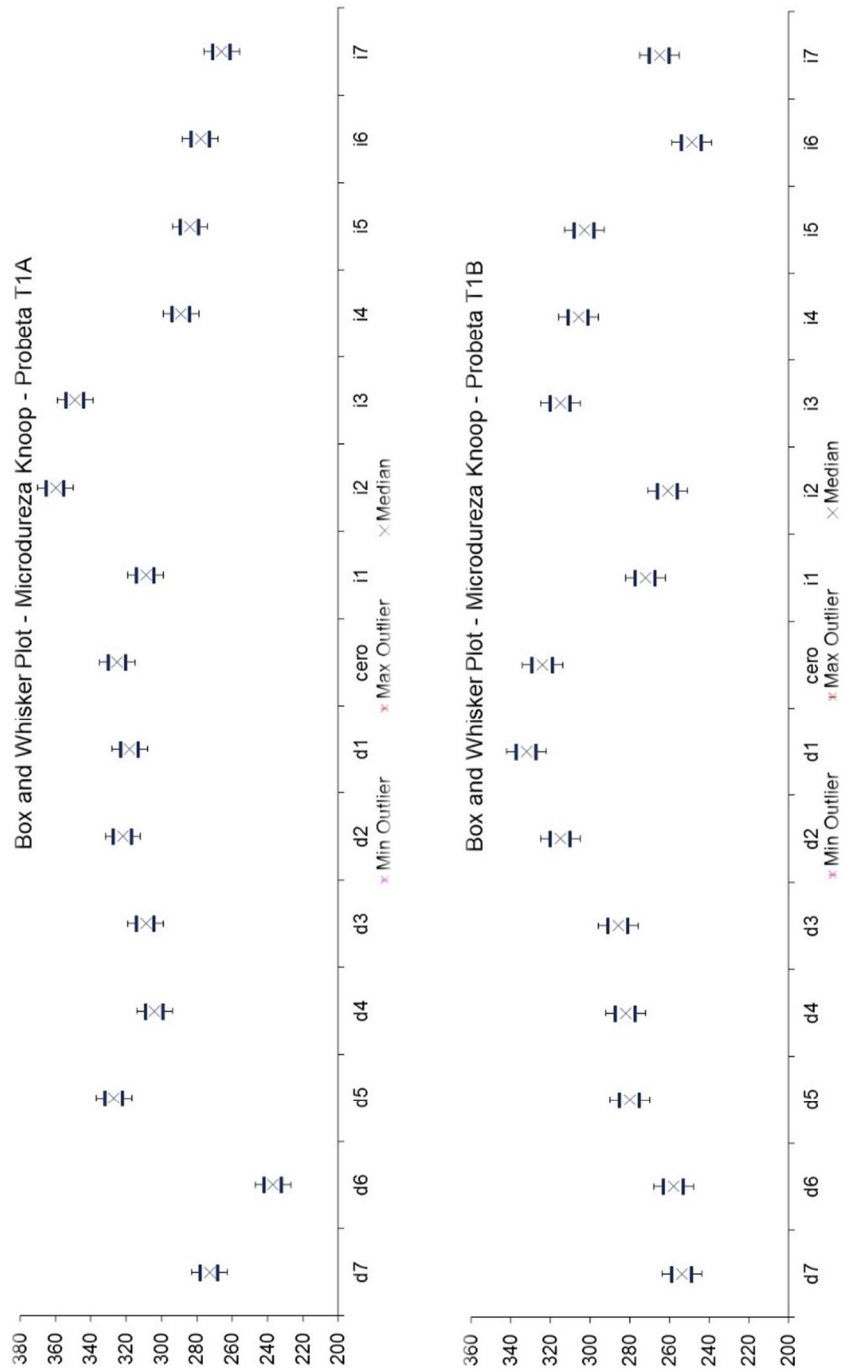
Este comportamiento de dureza mayor hacia la zona donde se hace la junta se puede atribuir en parte a la deformación causada durante la generación del recalcado en el proceso de soldadura como se muestra en la investigación de Ziemian et al., [2012].

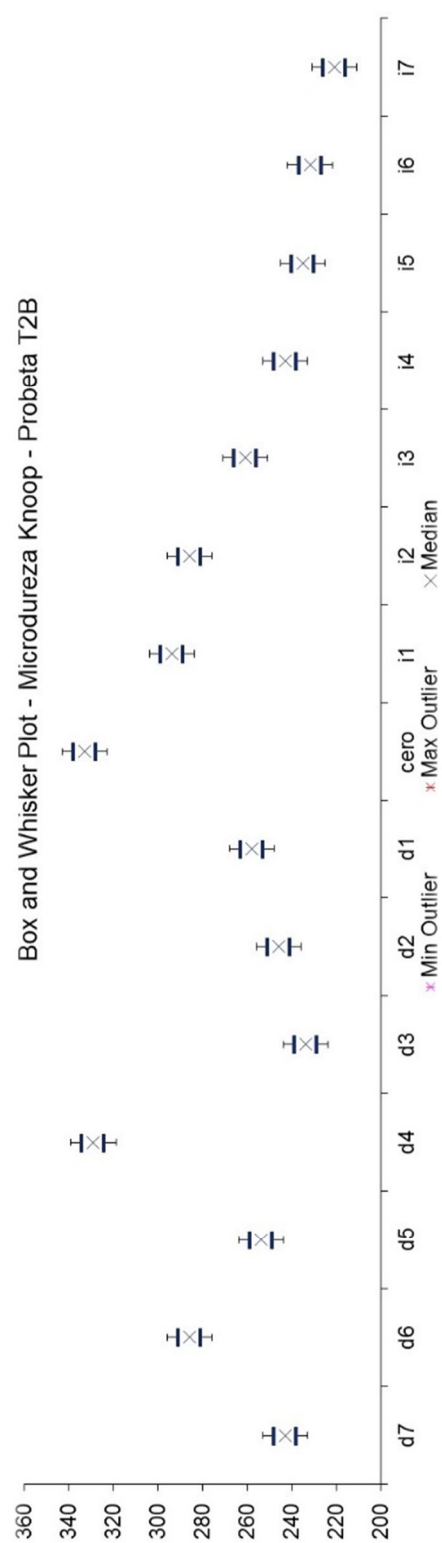
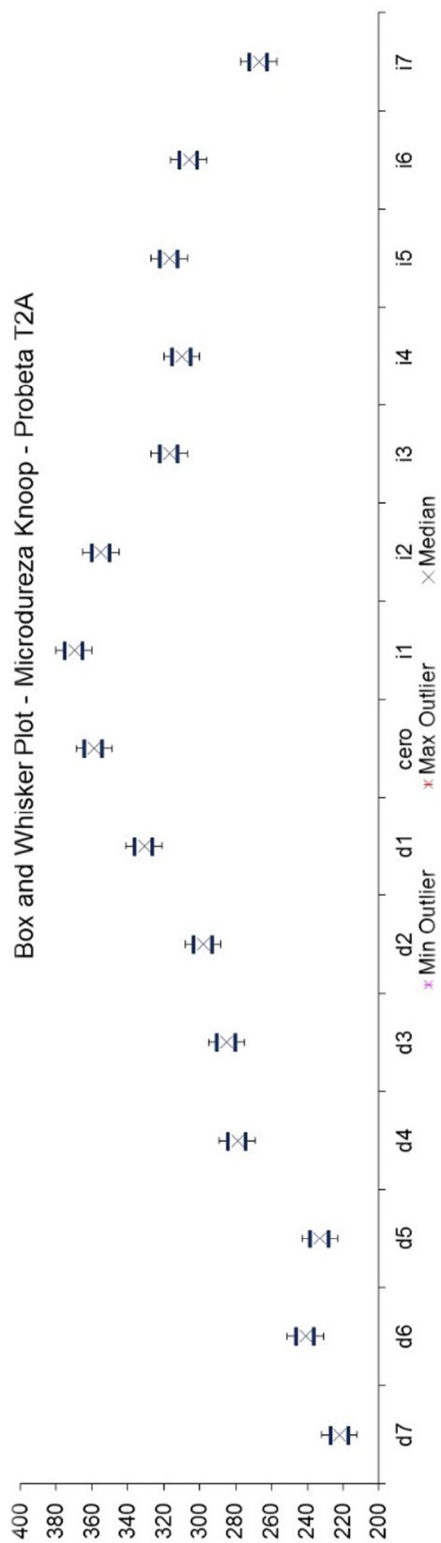
Tabla 7. Resultados análisis microdureza Knoop.

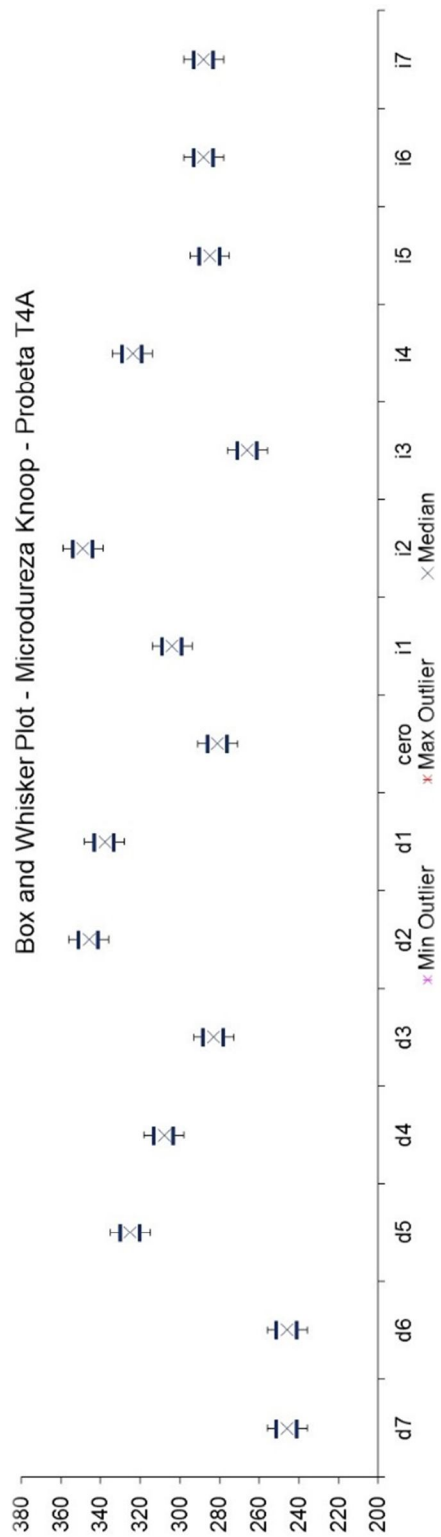
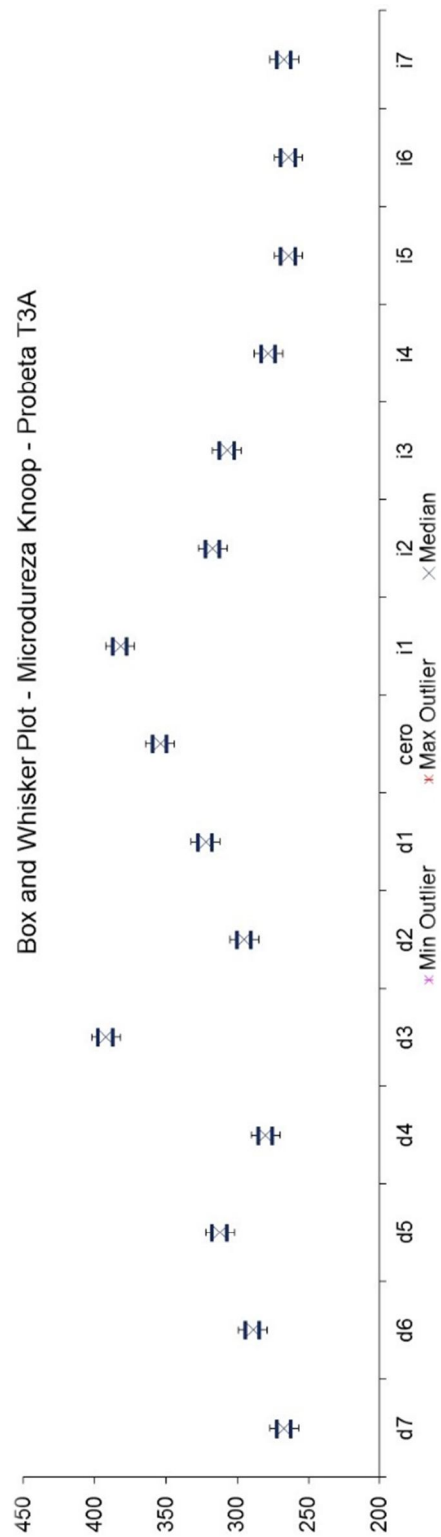
PROBETA A	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
d7	273	222	267	246	236	247	230	258
d6	237	241	289	246	240	233	246	269
d5	327	233	312	325	249	268	260	273
d4	304	279	280	308	266	256	246	292
d3	309	285	392	283	263	261	270	327
d2	322	298	295	346	264	253	293	295
d1	318	331	322	338	270	248	325	307
cero	325	359	354	281	293	289	325	323
i1	309	370	382	304	304	299	261	338
i2	360	355	317	349	324	322	293	279
i3	349	317	307	266	262	270	289	269
i4	289	310	278	324	295	267	289	267
i5	284	317	264	285	290	292	242	231
i6	278	306	264	288	248	278	251	224
i7	266	267	267	288	244	259	265	219
PROBETA B	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
d7	254	243	242	247	255	226	261	242
d6	258	286	287	256	239	236	280	242
d5	280	254	295	261	244	242	300	259
d4	282	329	303	297	272	268	317	293
d3	286	234	332	278	283	273	327	277
d2	315	246	317	270	298	285	278	277
d1	332	258	328	278	304	293	306	301
cero	324	333	304	320	315	332	347	295
i1	272	294	329	353	324	312	305	312
i2	261	286	313	293	318	300	328	339
i3	315	261	298	300	312	292	302	287
i4	306	243	321	273	290	279	293	278
i5	303	235	294	261	300	275	283	259
i6	249	232	283	258	267	332	269	265
i7	265	221	259	267	263	275	258	255

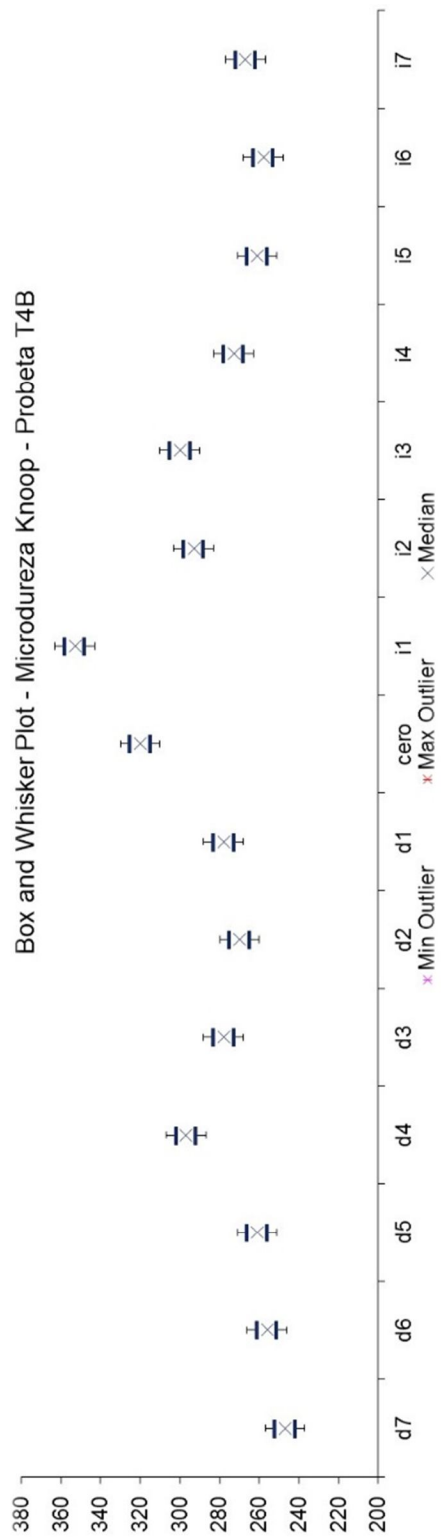
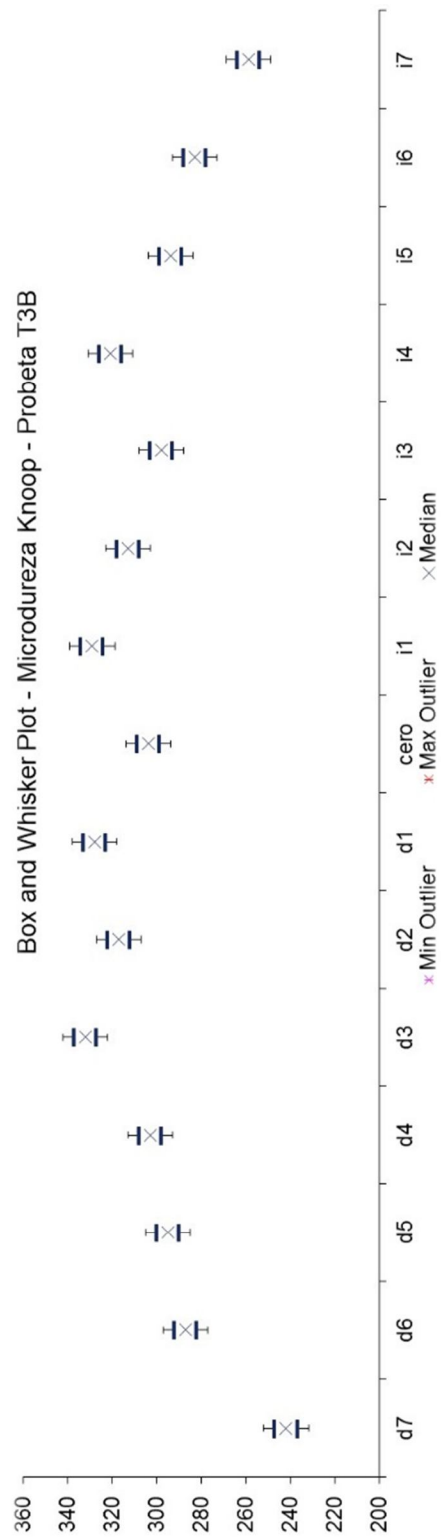
De igual manera, Centinkaya et al. [2006], afirma que la dureza se incrementa como resultado de una mayor presión en la zona de la soldadura lo que genera una mayor deformación, y al igual que en este estudio la dureza disminuye tanto a derecha como izquierda de la zona soldada. Sin embargo, Kim et al. [2009], muestra que en algunos casos la dureza en la zona de la soldadura es baja debido a la difusión

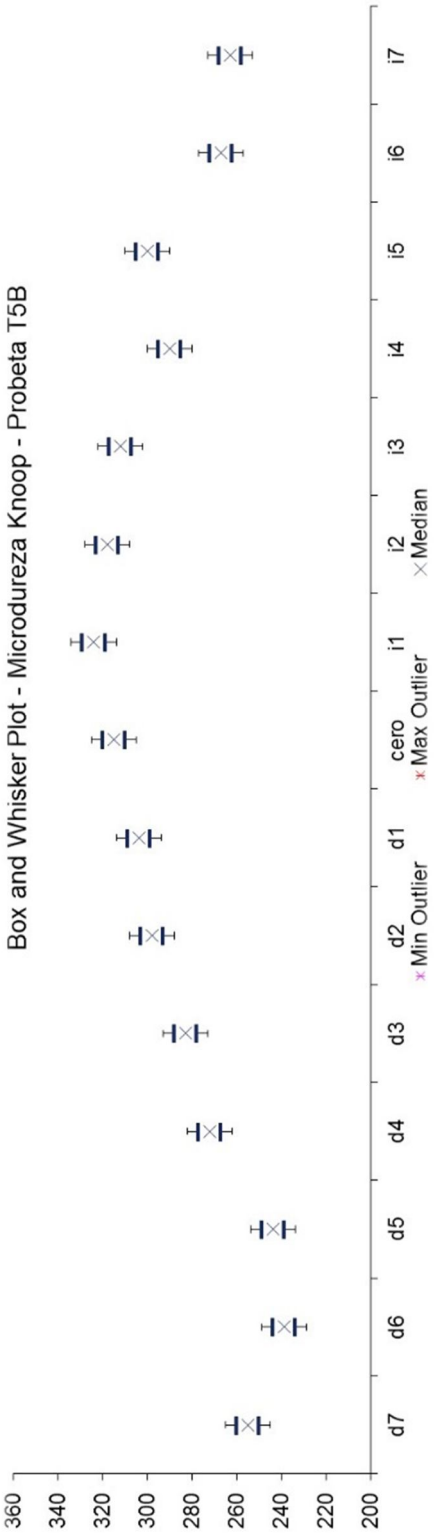
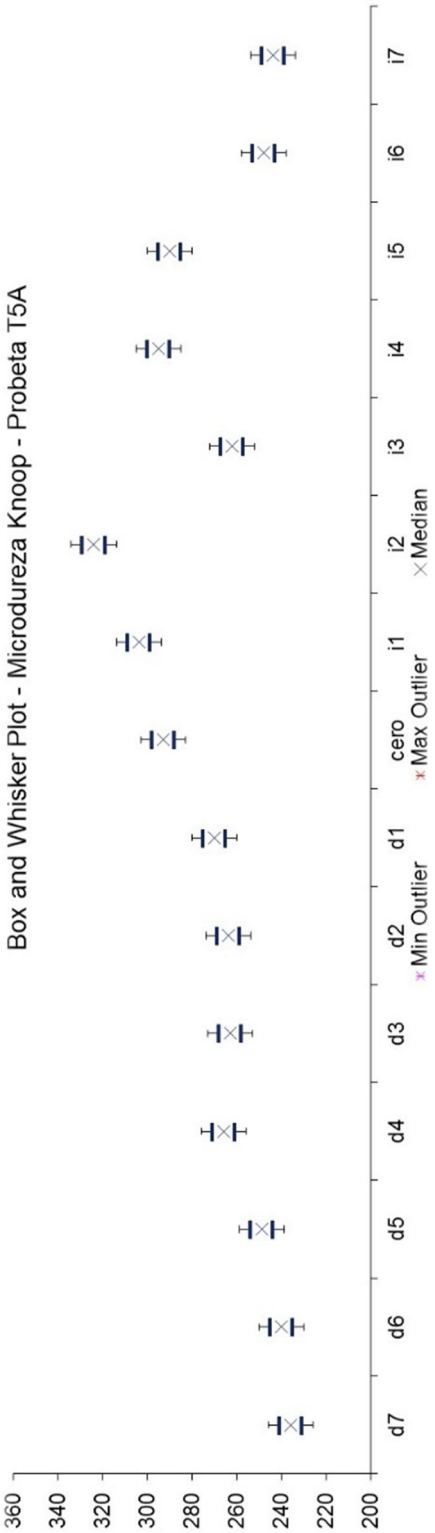
del carbono del material base durante la fusión del mismo en el proceso de destello y descargado fuera durante el recalcado. En la soldadura la microestructura es diferente por el tratamiento térmico que se produce.

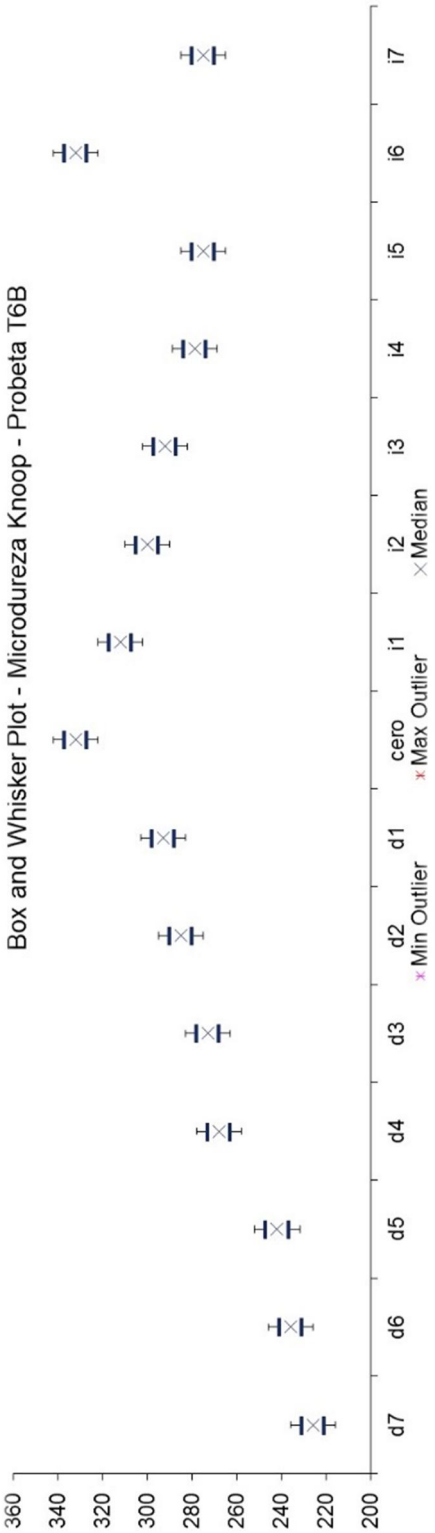
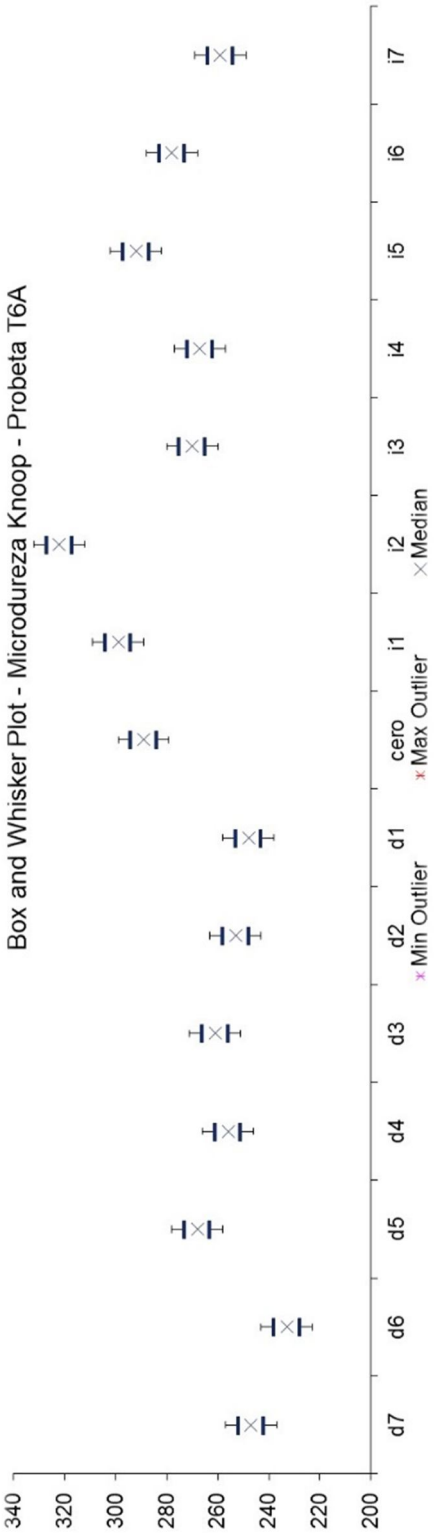


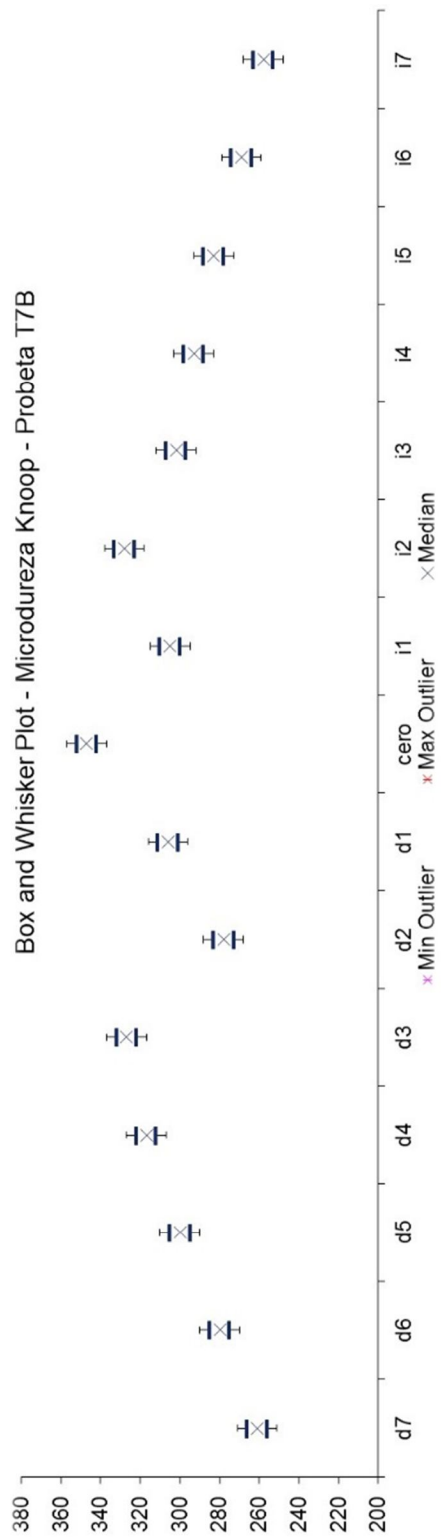
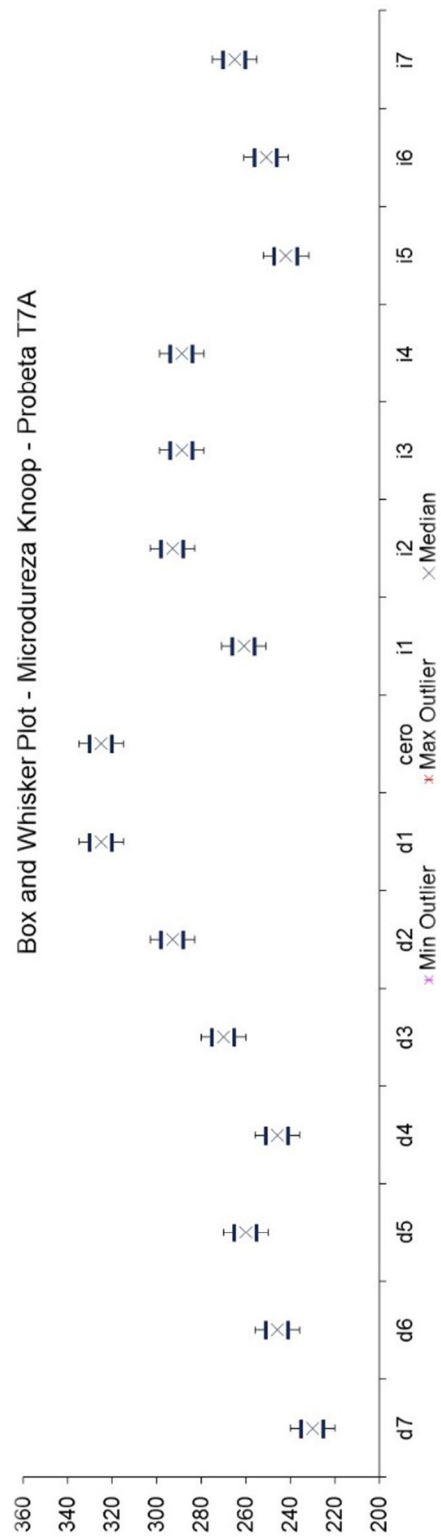












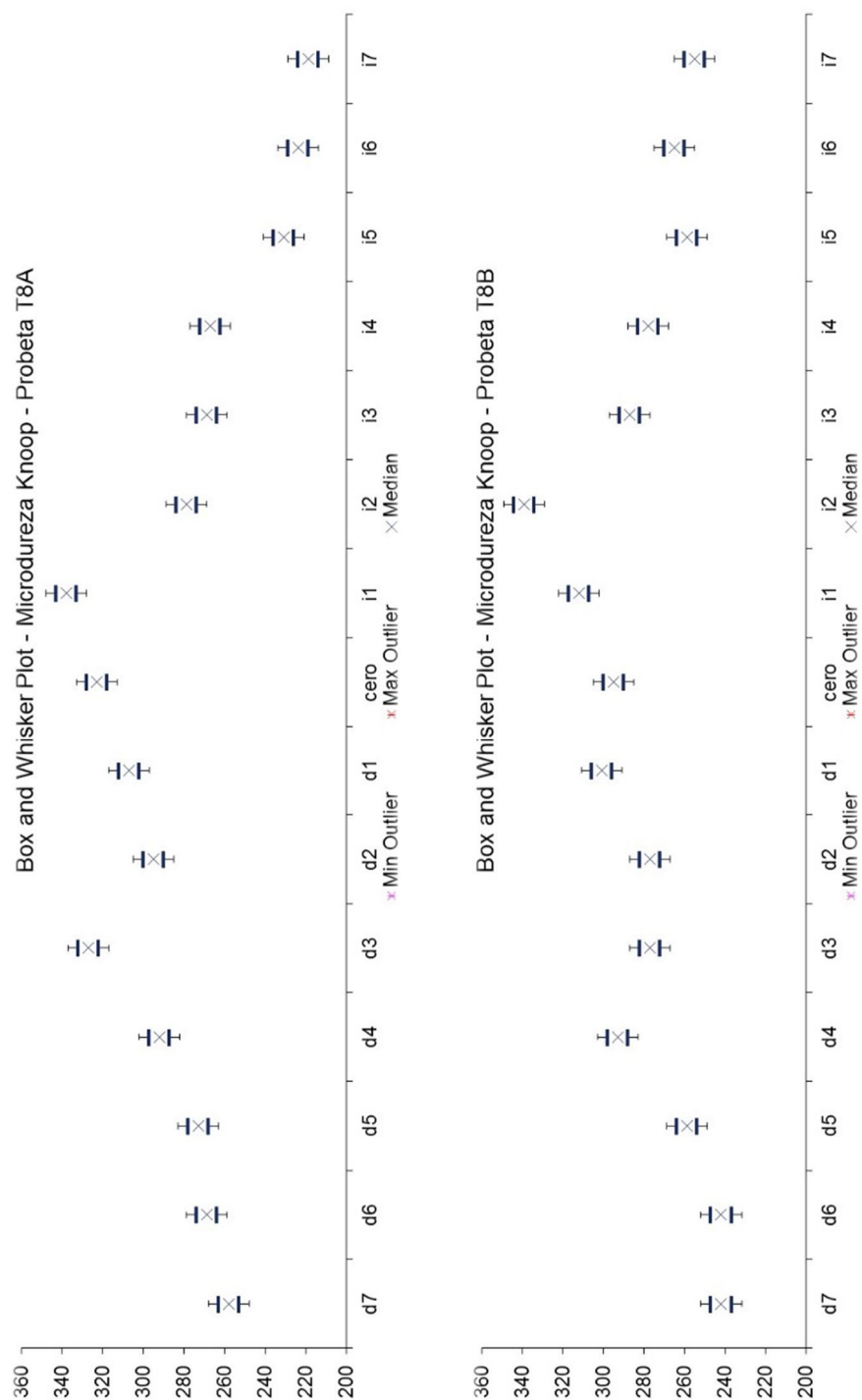


Figura 47. Grafico microdureza Knoop para las réplicas “A” y “B” del estudio.

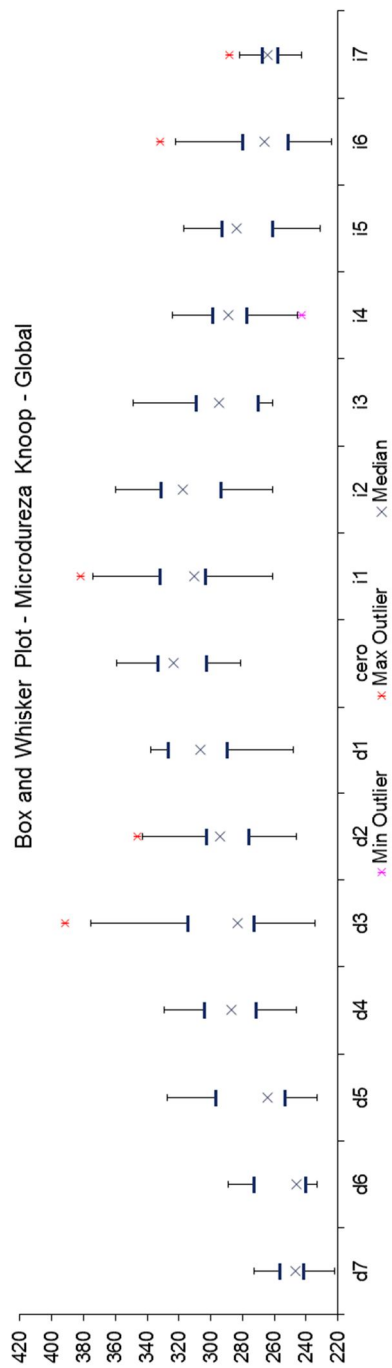


Figura 48. Gráfico promedio microdureza Knoop para las probetas A y B de cada uno de los tratamientos

Por otro lado, la microdureza Knoop reportada para el material base se midió en cada una de las probetas de todos los tratamientos, como se muestra a continuación en la tabla 8. Al observar estos datos gráficamente, se observa que presentan valores estables, es decir su variación es pequeña como se puede observar en la figura 49.

Tabla 8. Microdureza Knoop material base.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
PROBETA A	251	237	270	285	217	252	250	219
PROBETA B	246	221	255	240	250	226	245	241
PROMEDIO A-B	249	229	263	263	234	239	248	230

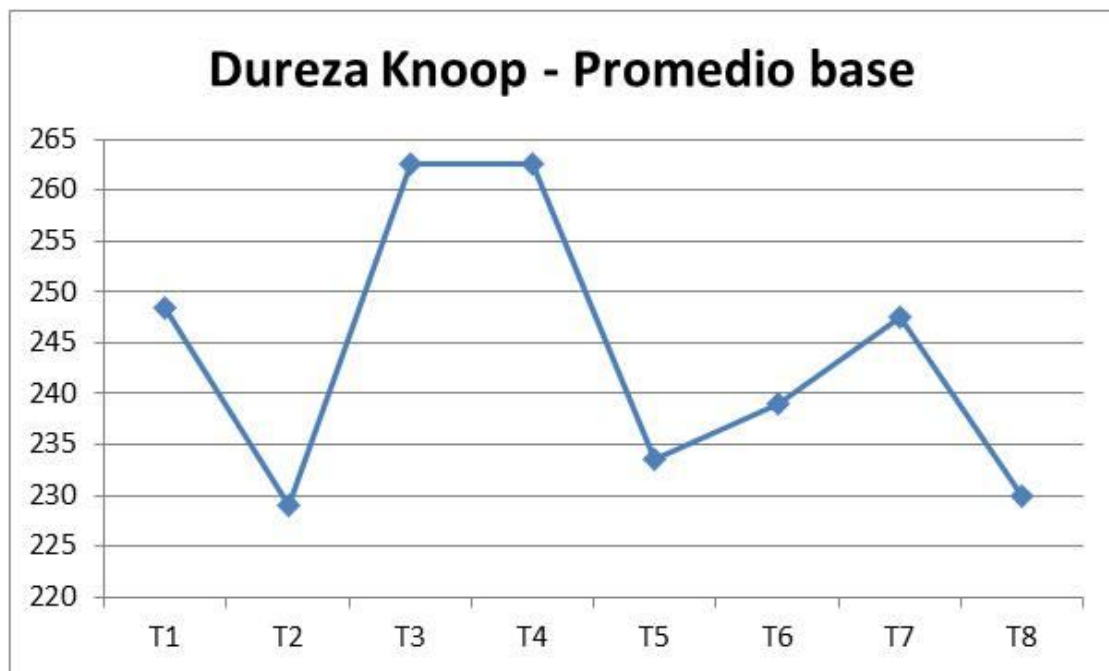


Figura 49. Gráfico microdureza Knoop. Valores promedio del material base para cada uno de los tratamientos.

3.3.3. Prueba de DobleZ

Los ensayos de doblez se realizaron según lo establecido en el capítulo 2. Los resultados son los que se exponen en la tabla 9. La evaluación se hace con los criterios cumple, cuando la prueba es satisfactoria y resiste un doblez de 180°; o por el contrario, no cumple cuando el resultado no es satisfactorio cuando se genera alguna rotura parcial o total.

Tabla 9. Resultados prueba de doblez.

No. Tratamiento	Probeta No.	Resultado Cumple – No Cumple
1	A	Cumple
	B	Cumple
2	A	No Cumple
	B	No Cumple
3	A	No Cumple
	B	Cumple
4	A	Cumple
	B	Cumple
5	A	No Cumple
	B	No Cumple
6	A	Cumple
	B	Cumple
7	A	Cumple
	B	Cumple
8	A	No Cumple
	B	No Cumple

Al observar los resultados de la prueba de doblez, se encuentra que los tratamientos No. 2, 5 y 8, presentan un comportamiento no conforme con el ensayo, estos presentaron rotura total de la junta soldada. Esta situación concuerda con los resultados obtenidos en la prueba de tracción para los tratamientos No. 2 y 8.

Imágenes de los resultados obtenidos del ensayo realizado en esta investigación se pueden observar en la figura 50, allí se pueden ver la probeta del tratamiento No. 1A que cumple con el estándar definido para el ensayo. En la figura 51, se observa el ensayo sobre la probeta 2A.



Figura 50. Prueba de doblez probeta con resultado conforme, probeta 1A.

Los resultados esperados son como los que se muestran en la figura 52, donde se observa en el estudio llevado a cabo por Singh, Shahi y Kaur (Singh, Shahi, & Kaur, 2013), que las muestras soldadas con poca entrada de calor tienen una buena ductilidad si se comparan con las que se hicieron con alto ingreso de calor. Resultados similares se obtuvieron en la prueba de tensión, donde se observó que las piezas soldadas con menor calor tenían una mayor resistencia que aquellas que fueron soldadas con mayor calor (Singh, Shahi, & Kaur, 2013).



Figura 51. Prueba de doblez con resultado no conforme, probeta 2A.



Figura 52. Probetas usadas en la prueba de doblez mostrando la ubicación de la fractura de las juntas soldadas con alta temperatura (H) y baja temperatura (L) de soldadura (Singh, Shahi, & Kaur, 2013)

De manera similar a lo que ocurre con el estudio de Singh et al., se tiene un comportamiento frágil para las probetas que fueron soldadas en condiciones de calor más altas, pues de acuerdo con diseño de experimentos expuesto en la tabla 4, las probetas de los tratamientos 2 y 5 recibieron más calor durante la soldadura debido a que se mantuvieron en los niveles altos de tiempo de destello lo que genera que la

junta se caliente durante más tiempo, adicional a lo anterior el tratamiento No. 5 recibió mayor calor debido a que el voltaje estuvo en nivel alto; finalmente, el tratamiento No. 8 tuvo un mayor calor debido a que se utilizó el nivel alto de voltaje lo que genera un mayor calor durante el proceso de soldadura.

4. ANALISIS DE VARIANZA - ANOVA

4.1. Análisis de Varianza del efecto de la combinación de parámetros definidos para el DOE.

Dentro de este análisis de varianza (ANOVA), se pretende entender el fenómeno de las combinaciones de los diferentes parámetros en los resultados de resistencia mecánica y % de elongación por medio de esta herramienta estadística. Se toman como hipótesis básicas las siguientes consideraciones:

- Normalidad, es decir los resultados se comportan como una distribución normal.
- Homocedasticidad, que implica que la varianza de los errores permanece constante.
- Independencia, con esto se entiende que los errores son variables aleatorias independientes.

Con respecto a las hipótesis del experimento se determinan las siguientes hipótesis nulas (H_0) correspondientes a lo relacionado con los resultados de las propiedades mecánicas,

- $H_0: \mu_1 = \mu_2$; μ es la media de la resistencia a la tracción alcanzada por las probetas soldadas durante el ensayo de tracción.
- $H_0: \mu_1 = \mu_2$; μ es la media del porcentaje de elongación obtenido durante el ensayo de tracción de las probetas.

Una hipótesis estadística es una afirmación sobre los valores de los parámetros de una población o proceso, que es susceptible de probarse a partir de la información contenida en una muestra representativa que es obtenida de la población. El nombre de hipótesis nula se deriva del hecho de que comúnmente se plantea como una igualdad, lo cual facilita el tener una distribución de probabilidad de referencia específica. La estrategia para probar una hipótesis es suponer que la hipótesis nula es verdadera, y que en caso de ser rechazada por la evidencia que aportan los datos, se estará aceptando la hipótesis alternativa. (Gutiérrez & De La Vara, 2008).

Para la hipótesis alterna (H_a) tenemos la siguiente relación,

- $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$; μ es la media de la resistencia a la tracción alcanzada por las probetas soldadas durante el ensayo de tracción.
- $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$; μ es la media del porcentaje de elongación obtenido durante el ensayo de tracción de las probetas.

4.1.1. Elaboración de análisis de varianza ANOVA.

Los valores de la tabla 6, fueron analizados por medio del análisis de varianza (ANOVA) para un Diseño de Experimentos Factorial 23, donde se pretende mostrar cuál de las combinaciones de parámetros

permitirá tener un mejor comportamiento para la soldadura de la junta para la resistencia a la tracción y para el porcentaje de elongación.

En la tabla 10 del análisis de varianza para la resistencia a la tracción, se puede observar el valor menor de la prueba F (F crítico) lo que indica que esta combinación de parámetros es la mejor para que se obtengan buenos resultados de resistencia a la tracción.

Tabla 10. Resultado análisis de varianza (ANOVA) para los resultados de resistencia a la tracción.

ANALISIS DE VARIANZA				alpha = 0,05		
Origen de la varianza	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Prueba F	F Critico	Probabilidad
REPLICAS	0,58333333	1	0,58333333	3,85888E-05	5,59144785	0,995216912
TRATAMIENTOS	72978,4822	7	10425,4975	0,689669545	3,78704354	0,681898707
A	14960,1753	1	14960,1753	0,989648441	5,59144785	0,352964907
B	5530,89031	1	5530,89031	0,365880537	5,59144785	0,564343469
A*B	2202,82031	1	2202,82031	0,1457214	5,59144785	0,713981835
C	4760,44031	1	4760,44031	0,314913578	5,59144785	0,592182785
A*C	7623,03781	1	7623,03781	0,504280687	5,59144785	0,500591209
B*C	12908,2278	1	12908,2278	0,853907609	5,59144785	0,386195185
A*B*C	24992,8903	1	24992,8903	1,653334565	5,59144785	0,23940374
ERROR	105816,594	7	15116,6563			
TOTAL	178795,659	15				

En esta evaluación, se pretende observar cual es el efecto de la combinación de los parámetros, de tal forma que se evalúan la combinación de parámetros que presentan los mejores resultados para la resistencia a la tracción.

Para esta tabla, la combinación A*B correspondiente a voltaje nivel bajo (VNB), altura de recalcado nivel alto (AFNA) y tiempo de destello nivel bajo (TDNB), fue la que presentó mejor resultado en el análisis de varianza. Esta combinación corresponde al tratamiento No. 4 que se estableció en la tabla No. 3.1., esta situación era previsible pues estos dos valores de resistencia a la tracción eran los reportados como más altos de resistencia mecánica.

En la tabla 11, se observa el resultado del análisis de varianza para los datos de porcentaje (%) de elongación que fue la otra propiedad mecánica que se evaluó en este estudio. En amarillo se puede observar que se encuentra el segundo valor menor seleccionado, esto se realizó de esta manera porque se pretende encontrar la combinación de los diferentes parámetros cuál es su aporte para cada uno de los resultados de esta característica. Esta combinación corresponde a voltaje nivel bajo (VNB), altura de recalcado nivel alto (AFNA) y tiempo de destello nivel bajo (TDNB). Al comparar con el análisis de varianza realizado para la resistencia a la tracción, se observa que presentan resultados similares.

Si se comparan los datos de estos dos análisis de varianza con los resultados observados en cuanto al lugar donde se generó la fractura, se encuentra también coherencia por cuanto como se observa en la tabla 6, la rotura para este tratamiento se presentó en un lugar diferente a la junta realizada por la soldadura.

De igual forma, si observamos estos resultados del análisis de varianza con los resultados obtenidos para la prueba de doblez, se puede observar que el resultado es coherente, puesto que para esta combinación de parámetros, se obtuvo que el resultado da conforme, es decir la probeta no se fracturó por la soldadura al realizar la prueba, tal como se observa en la tabla 9.

Tabla 11. Resultado análisis de varianza (ANOVA) para los resultados de % de elongación.

ANALISIS DE VARIANZA				alpha = 0,05		
Origen de la varianza	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Prueba F	F Critico	Probabilidad
REPLICAS	0,58333333	1	0,58333333	0,004294476	5,59144785	0,949582523
TRATAMIENTOS	666,5321875	7	95,21888393	0,700997535	3,78704354	0,674502244
A	108,4128125	1	108,4128125	0,798130698	5,59144785	0,401322232
B	36,3378125	1	36,3378125	0,267517491	5,59144785	0,62093896
A*B	4,5753125	1	4,5753125	0,033683264	5,59144785	0,85958519
C	1,5753125	1	1,5753125	0,011597386	5,59144785	0,917262366
A*C	38,9403125	1	38,9403125	0,28667699	5,59144785	0,608939569
B*C	6,2128125	1	6,2128125	0,045738472	5,59144785	0,836747899
A*B*C	470,4778125	1	470,4778125	3,46363844	5,59144785	0,10504397
ERROR	950,8338542	7	135,8334077			
TOTAL	1617,949375	15				

4.1.2. Definición de los parámetros adecuados para proceso de soldadura.

Para este proceso de soldadura por resistencia (Soldadura a tope por destello), se determina que los parámetros adecuados para las condiciones en las que se encuentra el soldador, están determinados por los resultados del análisis de varianza realizado en este capítulo.

De acuerdo con los resultados, la combinación resultante que presenta un mejor comportamiento es el que está relacionado con el tratamiento No. 4 que de acuerdo con la tabla No. 2.2., corresponde a la combinación voltaje nivel bajo (VNB), altura de recalado nivel alto (AFNA) y tiempo de destello nivel bajo (TDNB) como se puede ver en la tabla 12.

Según esta información, se puede determinar que los parámetros de soldadura para este proceso con la lámina SPFH 590 con espesor de 2.3 mm, son los que se describen a continuación,

Voltaje (posición del selector): posición No. 1

Altura de recalcado (Upset): 4.6 mm. Altura de calzo: 10.0 mm

Tiempo de destello (flashing time): 2 segundos. Velocidad del carro: 48 Hz

Estos parámetros, junto con las condiciones óptimas o adecuadas del soldador en cuanto a su estado de funcionamiento permitirán realizar de manera adecuada la soldadura a tope por destello (Flash Butt Welding) para el material SPFH 590 de 2.3 mm de espesor.

Tabla 12. Nivel del factor del tratamiento No. 4.

No. Tratamiento	Combinación Variables
4	VNB, AFNA, TDNB

4.2. Definición del procedimiento para el proceso de soldadura

El procedimiento para este proceso de soldadura está definido por los parámetros que se involucran para llevar a cabo la misma. De acuerdo con la ISO 15614-13 (ISO, 2005), los parámetros de la máquina para procesar piezas por medio de este método de soldadura son las siguientes:

- Ajustes de máquina.
 - Ajustes eléctricos
 - Posición Tap del transformador:
 - Voltaje secundario (v): (circuito abierto)
 - Ajustes mecánicos
 - Distancia inicial de electrodos (mm).
 - Longitud de sujeción lado izquierdo (mm).
 - Longitud de sujeción lado derecho (mm).
 - Fuerza/presión de sujeción lado izquierdo (N/bar).
 - Fuerza/presión de sujeción lado derecho (N/bar).
 - Parámetros de soldadura
 - Ver tabla No. 13.

Tabla 13. Parámetros de soldadura para soldadura de resistencia por destello (FBW). (ISO, 2005)

Paso del proceso	Ajuste de parámetros de soldadura								
	Fuerza (kN)	Voltaje secund.	Limitación de paso		Sec. Corriente (on/off)			Velocidad de la mesa	
			Distancia (mm)	Tiempo (s)	Tiempo On (s)	Tiempo Off (s)	No. de Cíclos	Vo mm/s	Ve mm/s
Destello inicial		100	3					0.4	0.8
Tiempo pausa				-----					
Pre calentamiento	5	50	4	3.5	0.5	0.2	5	-----	-----
Destello lineal		100	8	-----				0.8	1.4
Destello progresivo		100	11	-----				1.4	3
Recalcado	10	70	16	1.4	1.2	0.2	1		
Post calentamiento	8	40	-----	1.8	0.3	0.3	3		

En la anterior tabla se observan parámetros diferentes a los que se tuvieron en cuenta para el proceso de las muestras de este estudio debido a las limitaciones del equipo que se utilizó. Debido a lo anterior, se definen los siguientes parámetros:

- Parámetros de soldadura
 - Posición selector corriente (tap)
 - Velocidad de giro del motor
 - Apertura inicial mordazas
 - Presión pisadores

Estos parámetros se incluyen dentro del estándar de operación del proceso de soldadura que se tiene establecido en Colombiana de Frenos S.A.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

Se obtuvieron las juntas soldadas utilizando variación en tres de los parámetros principales que afectan el comportamiento de la misma, estas juntas no evidenciaron discontinuidades en la soldadura cuando fueron evaluadas de manera visual.

La ferrita acicular y la ferrita Widmanstätten obtenidas en la zona soldada luego del proceso de soldadura es correspondiente con lo que se espera cuando se tiene como base un material ferrítico.

El comportamiento mecánico fue evaluado por medio de las pruebas de resistencia a la tracción y de resistencia al doblado. Los resultados mostraron un comportamiento diferente para las combinaciones de parámetros realizadas. Lo anterior permite concluir que los parámetros de tiempo de destello, posición de voltaje y altura de recalcado afectaron el comportamiento mecánico de la junta y la estructura del material base.

La evaluación de la resistencia a la tracción, mostró que las probetas que recibieron mayor calor durante el proceso de soldadura fueron las de menor resistencia a la tracción y un porcentaje de elongación también menor.

La evaluación por pruebas de doblado, mostró un comportamiento similar al de las pruebas de tracción, donde los tratamientos que recibieron más calor presentaron falla en la junta, mientras que los que recibieron menor calor, mostraron un comportamiento aceptable.

La evaluación por microdureza Knoop, mostró un perfil de dureza esperado de acuerdo con la investigación, donde en el centro de la zona afectada por el calor (ZAC) se presentó la mayor microdureza, mientras que a medida que se aleja de la junta esta se redujo.

Los resultados de las pruebas de tracción presentaron comportamientos similares al comparar los mismos tratamientos; esto confirma la influencia que tienen los parámetros seleccionados para el desarrollo de esta investigación.

El comportamiento de las fallas analizado por medio de un estudio de fractografía, mostró fallas frágiles y dúctiles que se relacionaron directamente con la resistencia mecánica de las juntas realizadas de las diferentes combinaciones de parámetros. Estos resultados muestran que las piezas que fallaron fuera de la zona de soldadura presentan falla dúctil, mientras que los que fallaron por la junta soldada muestran falla frágil.

Los resultados de las pruebas mecánicas realizadas sobre las probetas soldadas con los parámetros de seleccionados para esta investigación, permitirá elegir de mejor manera las condiciones de operación.

óptimas para la fabricación de aros para ruedas de acero en un proceso continuo. A su vez, estos parámetros, servirán para la disminución de las piezas defectuosas en la máquina utilizada para este estudio, así como en otras que tengan un funcionamiento similar.

5.2. Recomendaciones.

Como complemento de este estudio, se puede realizar la investigación de:

Efecto sobre la resistencia mecánica de la soldadura a tope sin destello (butt welding) con transformador de media frecuencia en la fabricación de aros para ruedas de acero. La realización de este estudio, permitiría conocer el comportamiento esperado de la soldadura realizada en un soldador de última tecnología que se utiliza para la fabricación de aros para ruedas de acero.

Caracterización de la soldadura por medio de otras técnicas como microscopia de transmisión de electrones (TEM) y pruebas mecánicas como el test de Erichsen. Esta caracterización permitirá profundizar el análisis de la junta soldada.

Evaluación de fatiga de la soldadura a tope por destello. Esta evaluación permitirá conocer el comportamiento a fatiga de este tipo de soldadura en aceros HSLA.

Modelamiento de la soldadura a tope por destello (FBW) por medio de elementos finitos. Esta investigación permitirá por medio de este análisis, entender la relación entre la formación de la soldadura y los parámetros de soldadura.

Evaluación del efecto de precalentamiento y postweld en la microestructura y resistencia mecánica de la soldadura a tope por destello. Esta evaluación permitirá conocer el cambio en la microestructura y en la resistencia mecánica de un acero sometido a un proceso de soldadura a tope por destello.

Evaluación de diferentes métodos de inspección no destructiva en el proceso de soldadura a tope por destello durante la fabricación de aros para ruedas de acero. Esta evaluación permitirá conocer los métodos apropiados para hacer una evaluación no destructiva de la soldadura durante un proceso continuo de fabricación de aros de rueda.

Bibliografía

- Anderson, T. (2007). Ensuring a top notch weld inspection program. *TPJ: The Tube & Pipe Journal*.
- Anthony, D. A. (2007). *The horse, the wheel, and language: how Bronze-Age riders from the Eurasian steppes shaped the modern world*. Princeton, N.J: Princeton University Press.
- ASM. (1987). Modes of Fracture. In ASM, *Fractography* (pp. 33-140). ASM INTERNATIONAL.
- ASM. (1989). Liquid Penetrant Inspection. In ASM, *Nondestructive Evaluation and Quality Control* (pp. 136-177). ASM INTERNATIONAL.
- ASM. (1989). Radiographic Inspection. In ASM, *Nondestructive Evaluation and Quality Control* (pp. 628-763). ASM INTERNATIONAL.
- ASM. (1989). Visual Inspection. In ASM, *Nondestructive Evaluation and Quality Control* (pp. 10-25). ASM INTERNATIONAL.
- ASM. (1993). Flash Welding. In ASM, *Welding, Brazing and Soldering* (pp. 2086-2094). ASM INTERNATIONAL.
- ASTM. (1991). Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials. In ASTM, *Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM.
- AWS. (1969). Chapter 27. Flash, Upset, and Percussion Welding. In A. W. Society, *Welding handbook. Welding processes. Section two*. (pp. 27.2-27.24). American Welding Society.
- AWS. (2010). Standard Methods for Mechanical Testing of Welds. *B4 Committee on Mechanical Testing of Welds*.
- Barbosa, C., Dille, J., Delplancke, J.-L., Rebello, J., & Acselrad, O. (2006). A microstructural study of flash welded and aged 6061 and 6013 aluminum alloys. *Materials Characterization*, 187-192.
- Benscoter, A. O. (1985). Carbon and Alloy Steels: Metallographic Techniques and Microstructures. In ASM, *Metallography and Microstructures* (pp. 273-357). ASM INTERNATIONAL.
- Bolan, N. (2003). *My First Forty Cars: An Automotive Memoir*. Jefferson, North Carolina: McFarland & Company, Inc.
- Centinkaya, C., & Arabaci, U. (2006). Flash butt welding application on 16MnCr5 chain steel and investigations of mechanical properties. *Materials and Design*, 1187-1195.
- ETRTO. (2008). *The European Tire and Rim Technical Organization - Standard Manual*. The European Tire and Rim Technical Organization.
- European Steel and Alloy Grades. (2013). *steelnumber.com*. Retrieved from www.steelnumber.com
- FONTINE-GROTNES. (2011). *Wheel industry*. Retrieved from <http://www.fontijnegrotnes.com/Rim-production-lines>.
- Force, W. T. (2000). *Lightweight Microalloy Wheel Offers Higher Profit*. Retrieved from www.autosteel.org.
- Gonzaga, L. (2011). *Market trends and innovation on steel wheels*. Retrieved from www.autosteel.org

- Gutiérrez, H., & De La Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V.
- Hayes, C. (1997). The ABC's of Nondestructive Weld Examination. *NDTnet. Volume 3. No. 6*.
- Heck, T. (2004). *Automobile Steel Wheels, The Road to Dual Phase*. Retrieved from www.autosteel.org
- HESS. (2011). *DC Butt Welding System*. Hess Industries. Retrieved from www.hessindustries.com.
- HLI. (2003). *Inspection Plant for rim line*. Hayes Lemmerz International. HLI.
- HLI. (2004). *Procedure to Design Rim*. Hayes Lemmerz International. HLI.
- Honeycombe, R., & Bhadeshia, H. (1995). *Steels: microstructures and properties. 2nd edition*. Arnold, London.
- Ichiyama, Y., & Shinji, K. (2007). *Flash-Butt Welding of High Strength Steels*. NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 95. NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL.
- ISO. (2005). *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — welding procedure test — Part 13: Resistance butt and flash welding*. ISO.
- JATMA. (2009). *Japan Automobile Tire Manufacturers Association. Year Book*. Japan Automobile Tire Manufacturers Association.
- JSA. (1998). JIS G 3134:2006. Hot-rolled high strength steel plate, sheet and strip with improved formability for automobile structural uses. In J. J. Association, *JIS HANDBOOK Ferrous Materials & Metallurgy II*. JSA Japanese Standards Association.
- Kauffmann, E. (2003). *Characterization of Materials*. John Wiley and Sons.
- Kerstens, N. (2009). *Investigation and Control of Factors Influencing Resistance Upset Butt Welding*. Delft.: Thesis Master degree. TU Delft.
- Kim, D., So, W., & Kang, M. (2009). Effect of flash butt welding parameters on weld quality of mooring chain. *Archives of Materials Science and Engineering. Volume 38. Issue 2.*, 112-117.
- Kuehl, R. (2001). *Diseño de Experimentos. 2ª Edición*. México: Thompson Learning.
- Kumar, A., Kumar, B., Datta, G., & Ranganath, V. (2010). Effect of microstructure and grain size on the fracture toughness of a micro-alloyed steel. *Materials Science and Engineering A. Vol. 527.*, 954–960.
- Latime, H., & Matteson, R. (1993). Flash Welding. In A. INTERNATIONAL, *Welding, Brazing and Soldering. Volume 6* (pp. 728-732). ASM INTERNATIONAL.
- Min, K., Kim, K., & Kang, S. (2000). A study on resistance welding in steel sheets using a tailor-welded blank (1st report) Evaluation of upset weldability and formability. *Journal of Materials Processing Technology*, 186-192.
- Möser, M. (2015). *Fractography with the SEM (Failure Analysis)*. Retrieved from <http://martin-moeser.de/english/index.htm>: <http://martin-moeser.de/Images/Fractography.html>
- Ricks, R., Howell, P., & Barritte, G. S. (1982). The nature of acicular ferrite in HSLA steel weld metals. *Journal of material science. Volume 17.*, 732–740.
- Roberts, W. (1983). *Hot Rolling of Steel. First Edition*. Marcel Dekker, Inc.
- Roper, C. R. (1985). Plate Steels: Metallographic Techniques and Microstructures. *Metallography and Microstructures*, 367-389.

- Sharifitabara, M., Halvae, A., & Khorshahian, S. (2011). Microstructure and mechanical properties of resistance upset butt welded 304 austenitic stainless steel joints. *Materials and Design*. Vol 32., Pages 3854-3864.
- Singh, T., Shahi, A., & Kaur, M. (2013). Experimental studies on the effect of multipass welding on the mechanical properties of AISI 304 stainless steel SMAW joints. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, Issue 12.
- Surunaree University. (2015). *Surunaree University*. Retrieved from Labotary 9. Fractography: <http://web.sut.ac.th/2012/en/>
- Swift. (1990). *Types 91-AA and 92-AA Automatic Flash-Butt Welders. General operation instructions*. Kenton, Ohio: Swift-Ohio Company.
- TRA. (2010). *Annual Year Book. The Tire and Rim Association, Inc.* The Tire and Rim Association, Inc.
- Wang, W., Shi, Y., Lei, Y., & Tian, Z. (2005). FEM simulation on microstructure of DC flash butt welding for an ultra-fine grain steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 497-503.
- Werkstoffdaten. (2006). www.haw-hamburg.de/pers/Burger/nkbe/werkstoffdaten.xls. Retrieved from <http://www.haw-hamburg.de/pers/Burger/nkbe/werkstoffdaten.xls>
- Worldtracker. (2014). worldtracker.org/media/library/Engineering/Welding/Welding%20of%20Aluminum%20and%20its%20Alloys/35679_09.pdf. Retrieved from <http://worldtracker.org>
- Zambil, C. (n.d.). *Rueda con brazos*. Museo Nacional de Irán, Irán.
- Ziemian, C. W., Sharma, M. M., & Whaley, D. E. (2012). Effects of flashing and upset sequences on microstructure, hardness, and tensile properties of welded structural steel joints. *Materials and Design*, 175-184.
- Ziemian, C., Sharma, M., & Powanda, J. (2009). Study of the Flash Butt Welding of High-Strength Carbon-Manganese Steel. *Engineering Research and Innovation Conference*. Honolulu, Hawaii.
- Ziemian, C., Sharma, M., & Whaley Jr., D. (2008). Flash Butt-Welding Process Optimization Through the Design of Experiments. *Engineering Research and Innovation Conference*. Knoxville: Tennessee.